



Universidad
Carlos III de Madrid

Departamento de MECÁNICA DE MEDIOS CONTINUOS Y
TEORÍA DE ESTRUCTURAS

PROYECTO FIN DE CARRERA

INFLUENCIA DE LA GEOMETRÍA DEL PERCUTOR EN IMPACTOS DE BAJA VELOCIDAD SOBRE LAMINADOS DE MATERIAL COMPUESTO

Autora: Rocío Bejerano Callejas

Tutoras: Shirley Kalamis García Castillo

Sonia Sánchez Sáez

Leganés, Marzo de 2011

Título: INFLUENCIA DE LA GEOMETRÍA DEL PERCUTOR EN IMPACTOS DE BAJA VELOCIDAD SOBRE LAMINADOS DE MATERIAL COMPUESTO

Autora: Rocío Bejerano Callejas

Directoras: Shirley Kalamis García Castillo y Sonia Sánchez Sáez

EL TRIBUNAL

Presidente: _____

Vocal: _____

Secretario: _____

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día 18 de Marzo de 2011 en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE

A mis padres.

Agradecimientos

Agradecer a mis directoras del proyecto, Shirley K. García Castillo y Sonia Sánchez Sáez, todo el apoyo prestado durante la realización del proyecto.

En especial a mis padres, por todo su esfuerzo, cariño y el apoyo incondicional que me han dado durante todos los momentos duros y difíciles que he tenido que afrontar para llegar hasta aquí.

A mis hermanas, y al resto de familiares que de una u otra forma siempre estuvieron apoyándome y entendiéndome.

Y a Jose, por su paciencia y por darme ánimos siempre que lo he necesitado.

Muchas gracias a todos.

Resumen

En este proyecto fin de carrera se ha estudiado la influencia que tiene la geometría del percutor sobre la respuesta obtenida frente a impactos de baja velocidad de un laminado de material compuesto, en función de la energía de impacto utilizada. Para la realización del estudio se ha utilizado un tejido equilibrado de fibra de vidrio E en matriz poliéster.

Durante el desarrollo de este proyecto se trabajará con placas, las cuáles se someterán a cargas dinámicas con diferentes tipos de percutores, que varían en geometría y peso. Posteriormente, se llevará a cabo el cálculo de los parámetros más representativos de cada impacto, cómo son la fuerza máxima ejercida sobre las probetas, el desplazamiento máximo del percutor y la energía absorbida.

A partir de los resultados obtenidos, se realizará la evaluación y el análisis de los mismos en función de la forma y tamaño de los percutores y de la energía de impacto utilizada.

Por último, se llevará a cabo la evaluación no destructiva de las placas ensayadas, por medio de una inspección visual, con la que se definirá la forma y el daño provocado por el impacto, y el cálculo de la extensión del área dañada, usando el programa de tratamiento de imágenes, Image-J, en función de la forma del percutor y la energía de impacto utilizada.

Índice General

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 MOTIVACIÓN.....	2
1.2 OBJETIVOS.....	6
1.3 RESUMEN	7
CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES	8
2.1 INTRODUCCIÓN	9
2.2 MATERIALES COMPUESTOS	9
2.2.1 Matrices	11
2.2.1.1 <i>Matrices orgánicas</i>	12
2.2.1.2 <i>Resina poliéster</i>	12
2.2.2 Refuerzos	14
2.2.2.1 <i>Fibra de vidrio</i>	16
2.2.2.2 <i>Fibra de vidrio E</i>	17
2.2.3 Laminados.....	20
2.2.3.1 <i>Láminas de cinta</i>	20
2.2.3.2 <i>Láminas de tejido</i>	21
2.2.3.3 <i>Métodos de fabricación</i>	22
2.3 ESTUDIOS DE IMPACTOS	25
2.3.1 Impactos a alta velocidad	26
2.3.2 Impactos a baja de velocidad	28
2.4 MODOS DE FALLO	31
2.4.1 Daños en la matriz	31
2.4.2 Delaminación	34
2.4.3 Rotura de fibra.....	37
2.5 INFLUENCIA DE LA GEOMETRÍA DE LOS PERCUTORES	38
2.5.1 Estudios de alta velocidad	39

2.5.1.1	<i>Experimentales</i>	39
2.5.1.2	<i>Analíticos</i>	41
2.5.2	Estudios de baja velocidad	42
2.5.2.1	<i>Experimentales</i>	43
2.5.2.2	<i>Analíticos</i>	44
2.6	EVALUACIÓN NO DESTRUCTIVA	45
CAPÍTULO 3. DESARROLLO EXPERIMENTAL		47
3.1	INTRODUCCIÓN	48
3.2	MATERIALES	48
3.3	ENSAYOS DE IMPACTO	51
3.3.1	Equipo	51
3.3.2	Probetas	54
3.3.3	Utillajes	55
3.3.3.1	<i>Percutores</i>	55
3.3.3.2	<i>Sistema de amarre</i>	57
3.3.4	Procedimiento experimental	58
3.3.5	Tratamiento de datos	58
3.4	EVALUACIÓN NO DESTRUCTIVA	66
3.4.1	Procedimiento experimental	67
CAPÍTULO 4. RESULTADOS EXPERIMENTALES		71
4.1	INTRODUCCIÓN	72
4.2	RESULTADOS DEL TRATAMIENTO DE DATOS	72
4.2.1	Fuerza	72
4.2.1.1	<i>Fuerza máxima</i>	79
4.2.2	Desplazamiento	82
4.2.2.1	<i>Desplazamiento máximo</i>	83
4.2.3	Gráficas fuerza-desplazamiento	87
4.2.4	Energía	90

4.3 RESULTADOS CUANTITATIVOS	95
4.3.1 Energía absorbida	95
4.3.2 Porcentaje de área dañada.....	100
4.4 RESULTADOS CUALITATIVOS	105
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	111
5.1 CONCLUSIONES	112
5.2 TRABAJOS FUTUROS.....	115
CAPÍTULO 6. BIBLIOGRAFÍA	116

Índice de Figuras

Figura 1. Algunas de las aplicaciones del material compuesto	2
Figura 2. Tuberías de fibra de vidrio/poliéster (Compañía Protesa).....	3
Figura 3. Propiedades principales de las fibras. Prepreg Technology. Hexcel	15
Figura 4. Fibra de vidrio. www.nauticaescalada.com	19
Figura 5. Tipos de laminados con láminas de cinta. Prepreg Technology. Hexcel.....	20
Figura 6. Tipos de láminas de tejido. Prepreg Technology. Hexcel.....	21
Figura 7. Representación de fuerzas en una lámina de tejido equilibrado. www.hexcel.com	22
Figura 8. Primera etapa de un proceso de fabricación de materiales preimpregnados. www.hexcel.com	23
Figura 9. Segunda etapa de un proceso de fabricación de materiales preimpregnados. www.hexcel.com	23
Figura 10. Proceso de fabricación de materiales preimpregnados en una torre vertical. www.hexcel.com	24
Figura 11. Proceso de fabricación de materiales preimpregnados en una torre horizontal. www.hexcel.com	24
Figura 12. Iniciación del daño en una placa impactada de material compuesto 0/90/0. Review of low-velocity impact properties of composite materials, 1996.	32
Figura 13. Forma de daño: a) Pino, b) Pino invertido (Abrate, 1998)	33
Figura 14. Orientación y forma de las delaminaciones. Abrate (1998).....	35
Figura 15. Modos de fallo de un laminado de tejido de vidrio en matriz poliéster. www.chemia.com	37
Figura 16. Ferry fabricado en fibra de vidrio/poliéster. www.marmenorferry.com	49
Figura 17. Tren con el interior fabricado en fibra de vidrio/poliéster. www.metromadrid.es	50
Figura 18. Aerogenerador con componentes de fibra de vidrio/poliéster. www.opex-energy.com	50
Figura 19. Depósitos y tubería fabricados en fibra de vidrio/poliéster. www.plastimarmol.com	50
Figura 20. Torre de caída Ceast 6785 Fractovis.	53
Figura 21. Cámara superior de la Torre de caída Ceast 6785 Fractovis.	53

Figura 22. Geometría de probeta utilizada	54
Figura 23. Geometría de los percutores utilizados	55
Figura 24. Útil para amarrar las probetas.	57
Figura 25. Curva fuerza vs. tiempo registrada en el ensayo de impacto a 20J en la torre de caída, con un percutor semiesférico $\varnothing= 20,04\text{mm}$ sobre un tejido de fibra de vidrio en matriz poliéster	59
Figura 26. Esquema del equilibrio dinámico de fuerzas sobre el percutor. (Comportamiento de componentes estructurales bajo cargas impulsivas. Departamento de Mecánica de Medios Continuos. Universidad Carlos III)	59
Figura 27. Curva aceleración vs. tiempo registrada en el ensayo de impacto a 20J en la torre de caída, con un percutor semiesférico $\varnothing= 20,04\text{mm}$ sobre un tejido de fibra de vidrio en matriz poliéster	60
Figura 28. Curva velocidad vs. tiempo registrada en el ensayo de impacto a 20J en la torre de caída, con un percutor semiesférico $\varnothing= 20,04\text{mm}$ sobre un tejido de fibra de vidrio en matriz poliéster	61
Figura 29. Curva desplazamiento vs. tiempo registrada en el ensayo de impacto a 20J en la torre de caída, con un percutor semiesférico $\varnothing= 20,04\text{mm}$ sobre un tejido de fibra de vidrio en matriz poliéster	62
Figura 30. Curva fuerza vs. desplazamiento registrada en el ensayo de impacto a 20J en la torre de caída, con un percutor semiesférico $\varnothing= 20,04\text{mm}$ sobre un tejido de fibra de vidrio en matriz poliéster	64
Figura 31. Curva energía vs. tiempo registrada en el ensayo de impacto a 20J en la torre de caída, con un percutor semiesférico $\varnothing= 20,04\text{mm}$ sobre un tejido de fibra de vidrio en matriz poliéster	65
Figura 32. Esquema tipo de una placa dañada y sin dañar. Effects of impactor size on impact damage-growth and residual properties in an SMC-R50 composite. S.K. Chaturvedi and R.L. Sierakowski et. al.1984)	66
Figura 33. Fotografía digital de una muestra impactada con el percutor semiesférico SE2 $\varnothing=20,04\text{mm}$ con una energía de impacto de 15J	67
Figura 34. Medida del ancho de una muestra impactada. Image-J	68
Figura 35. Cambio de la escala de medida. Image-J.....	69
Figura 36. Selección del contorno dañado. Image-J	69
Figura 37. Elección de resultados. Image-J	70
Figura 38. Obtención de la medida del área dañada. Image-J.....	70

Figura 39. Comparación de los registros experimentales de fuerza utilizando el percutor semiesférico 1 $\varnothing=25,14\text{mm}$, para todos los niveles de energía de impacto	74
Figura 40. Comparación de los registros experimentales de fuerza utilizando el percutor semiesférico 2 $\varnothing=20,4\text{mm}$, para todos los niveles de energía de impacto	74
Figura 41. Comparación de los registros experimentales de fuerza utilizando el percutor semiesférico 3 $\varnothing=16\text{mm}$, para todos los niveles de energía de impacto	75
Figura 42. Comparación de los registros experimentales de fuerza utilizando el percutor semiesférico 4 $\varnothing=12,42\text{mm}$, para todos los niveles de energía de impacto	75
Figura 43. Comparación de los registros experimentales de fuerza utilizando el percutor plano 5 $\varnothing=25,52\text{mm}$, para todos los niveles de energía de impacto.....	76
Figura 44. Comparación de los registros experimentales de fuerza utilizando el percutor plano 6 $\varnothing=20\text{mm}$, para todos los niveles de energía de impacto.....	76
Figura 45. Comparación de los registros experimentales de fuerza utilizando el percutor plano 7 $\varnothing=16,13\text{mm}$, para todos los niveles de energía de impacto.....	77
Figura 46. Comparación de los registros experimentales de fuerza utilizando el percutor plano 8 $\varnothing=12,73\text{mm}$, para todos los niveles de energía de impacto.....	77
Figura 47. Representación de la fuerza máxima vs.la energía de impacto, en ensayos en la torre de caída utilizando los percutores semiesféricos	79
Figura 48. Representación de la fuerza máxima vs.la energía de impacto, en ensayos en la torre de caída utilizando los percutores planos.....	80
Figura 49. Comparación de fuerza máxima vs.la energía de impacto de percutores con el mismo diámetro.....	81
Figura 50. Comparación de los registros experimentales de desplazamiento utilizando el percutor semiesférico 1, para todos los niveles de energía de impacto ensayados	82
Figura 51. Comparación de los registros experimentales de desplazamiento utilizando el percutor semiesférico 2, para todos los niveles de energía de impacto ensayados	83
Figura 52.Representación del desplazamiento máximo vs. la energía de impacto, en ensayos en la torre de caída utilizando los percutores semiesféricos.....	84
Figura 53.Representación del desplazamiento máximo vs. la energía de impacto, en ensayos en la torre de caída utilizando los percutores planos.....	85
Figura 54.Comparación del desplazamiento máximo vs. la energía de impacto de percutores con el mismo diámetro.	86
Figura 55. Comparación de los registros experimentales de fuerza-desplazamiento utilizando el percutor semiesférico $\varnothing=12,72\text{mm}$, para un nivel de energía de 15J	87

Figura 56. Comparación de los registros experimentales de fuerza-desplazamiento utilizando el percutor semiesférico $\varnothing=12,72\text{mm}$, para un nivel de energía de 20J	88
Figura 57. Comparación de los registros experimentales de fuerza-desplazamiento utilizando el percutor semiesférico $\varnothing=12,72\text{mm}$, para un nivel de energía de 25J	88
Figura 58. Comparación de los registros experimentales de fuerza-desplazamiento utilizando el percutor semiesférico $\varnothing=12,72\text{mm}$, para un nivel de energía de 30J	89
Figura 59. Representación de la energía vs. tiempo, utilizando el percutor semiesférico SE1 $\varnothing=25,40\text{mm}$, para cada nivel de energía	90
Figura 60. Representación de la energía vs. tiempo, utilizando el percutor semiesférico SE2 $\varnothing=20,40\text{mm}$, para cada nivel de energía	91
Figura 61. Representación de la energía vs. tiempo, utilizando el percutor semiesférico SE3 $\varnothing=16\text{mm}$, para cada nivel de energía	91
Figura 62. Representación de la energía vs. tiempo, utilizando el percutor semiesférico SE4 $\varnothing=12,72\text{mm}$, para cada nivel de energía	92
Figura 63. Representación de la energía vs. tiempo, utilizando el percutor plano PL5 $\varnothing=25,52\text{mm}$, para cada nivel de energía	92
Figura 64. Representación de la energía vs. tiempo, utilizando el percutor plano PL6 $\varnothing=20\text{mm}$, para cada nivel de energía	93
Figura 65. Representación de la energía vs. tiempo, utilizando el percutor plano PL7 $\varnothing=16,13\text{mm}$, para cada nivel de energía	93
Figura 66. Representación de la energía vs. tiempo, utilizando el percutor plano PL8 $\varnothing=12,73\text{mm}$, para cada nivel de energía	94
Figura 67. Representación de la energía absorbida vs. la energía de impacto, en ensayos en la torre de caída utilizando percutores semiesféricos	95
Figura 68. Representación de la energía absorbida vs. la energía de impacto, en ensayos en la torre de caída utilizando percutores planos	96
Figura 69. Representación de la energía absorbida vs. la energía de impacto, en ensayos en la torre de caída utilizando los percutores semiesférico SE1 y plano PL5 de 25mm de diámetro ...	97
Figura 70. Representación de la energía absorbida vs. la energía de impacto, en ensayos en la torre de caída utilizando los percutores semiesférico SE2 y plano PL6 de 20mm de diámetro ...	98
Figura 71. Representación de la energía absorbida vs. la energía de impacto, en ensayos en la torre de caída utilizando los percutores semiesférico SE3 y plano PL7 de 16mm de diámetro ...	98
Figura 72. Representación de la energía absorbida vs. la energía de impacto, en ensayos en la torre de caída utilizando los percutores semiesférico SE4 y plano PL8 de 12,5mm de diámetro	99

Figura 73.Representación del % área dañada vs.la energía de impacto, en ensayos en la torre de caída utilizando los percutores semiesféricos	100
Figura 74.Representación del % área dañada vs.la energía de impacto, en ensayos en la torre de caída utilizando los percutores planos.....	101
Figura 75.Representación del % área dañada vs.la energía de impacto, en ensayos en la torre de caída utilizando el percutor semiesférico SE1 y plano PL5 de diámetro 25,5mm	102
Figura 76.Representación del % área dañada vs.la energía de impacto, en ensayos en la torre de caída utilizando el percutor semiesférico SE2 y plano PL6 de diámetro 20mm	103
Figura 77.Representación del % área dañada vs.la energía de impacto, en ensayos en la torre de caída utilizando el percutor semiesférico SE3 y plano PL7 de diámetro 17mm	103
Figura 78.Representación del % área dañada vs.la energía de impacto, en ensayos en la torre de caída utilizando el percutor semiesférico SE4 y plano PL8 de diámetro 12,5mm	104
Figura 79.Representación del daño con percutores semiesféricos.	109
Figura 80.Representación del daño con percutores planos.....	109

Índice de Tablas

Tabla 1. Componentes de los materiales compuestos. Fuente: Miravete (1990)	10
Tabla 2. Tipos de matrices de los materiales compuestos. Fuente: Miravete (1990)	11
Tabla 3. Tipos de resinas de poliéster. Fuente: Miravete (1990).....	14
Tabla 4. Tipos de fibras. Fuente: Miravete (1990)	15
Tabla 5. Composición de la fibra de vidrio E. Fuente: Antequera et al. (1991).....	18
Tabla 6. Propiedades de la fibra de vidrio E. Fuente: Miravete (1990).....	18
Tabla 7. Propiedades de la resina poliéster curada, AROPOL FS6902. Fuente:ASHLAND	49
Tabla 8. Medidas de los percutores semiesféricos utilizados	56
Tabla 9. Medidas de los percutores planos utilizados	56
Tabla 10. Observación visual del daño el en material compuesto ensayado con percutores semiesféricos en la torre de caída	106
Tabla 11. Observación visual del daño en el material compuesto ensayado con percutores planos en la torre de caída	106

Capítulo 1.

INTRODUCCIÓN

1.1 MOTIVACIÓN

La fabricación y el empleo de los materiales compuestos comenzaron a desarrollarse significativamente en los años 30, y desde entonces sus avances han sido impulsados por la industria aeronáutica y aeroespacial, debido a la necesidad de encontrar materiales que cumplan con dos requisitos, ser ligeros y resistentes. A lo largo de estos años, los materiales compuestos han sufrido un gran desarrollo, y su uso se ha extendido tanto, que cuentan con una presencia habitual en los coches, el transporte aéreo, los deportes, etc.



Figura 1. Algunas de las aplicaciones del material compuesto

Existe una gran variedad de materiales compuestos en el mercado, cada uno de ellos con diferentes características y coste. Los más empleados a nivel industrial son los laminados, formados por el apilamiento de varias láminas de matriz orgánica (epoxi, poliéster, vinilester, etc.) reforzada con fibras continuas de alta resistencia (carbono, aramida, vidrio, boro, etc.). Estos plásticos reforzados con fibras, se están utilizando debido a las excelentes propiedades que poseen frente a los materiales más usuales en la construcción como pueden ser el acero, hormigón, etc. Fundamentalmente se usan en aplicaciones estructurales en las que se necesita una reducción de peso, y esto es debido a que además poseen una elevada resistencia y rigidez específica, y un excelente comportamiento frente a fatiga y corrosión (Mangalgiri, 1999).

Los materiales compuestos de fibra de vidrio en matriz polimérica están siendo ampliamente empleados, y además, con buenos resultados, en la industria de transporte, química y de construcción, para la fabricación de tuberías y depósitos de almacenaje, de combustibles y agua. Esto es debido, a las buenas propiedades mecánicas que presenta, su baja densidad, su gran estabilidad química, su amplia vida útil y, sobre todo, su bajo coste de fabricación, montaje y mantenimiento.



Figura 2. Tuberías de fibra de vidrio/poliéster (Compañía Protosa)

Entre las limitaciones que tienen estos materiales, es que existen diversas causas que pueden producir daño en este tipo de estructuras, siendo el impacto generalmente reconocido como la condición de carga más severa para los materiales compuestos de tipo laminado (Hawyes et al., 2001). Los impactos pueden generar diferentes modos de fallo en estos tipos de materiales: delaminaciones, rotura de fibras, agrietamiento de la matriz o despegue entre fibra y matriz. Cada uno de estos modos de fallo producirá un daño diferente en el material, alterando también de manera distinta las propiedades del compuesto.

Las estructuras pueden verse afectadas por diferentes tipos de impactos, de baja o alta velocidad, bien durante su vida útil, su vida en servicio, o bien durante las operaciones de montaje y mantenimiento. Los impactos de alta velocidad pueden ser por ejemplo, los producidos por basura espacial sobre un satélite en órbita o una lanzadera espacial. Mientras que los impactos de baja velocidad, pueden deberse a la caída de una herramienta en las

operaciones de mantenimiento o montaje de la estructura, o como en el caso de los barcos, los procesos de impacto más comunes van desde el contacto diario con los muelles, a las colisiones con desechos flotantes y otras naves.

Los materiales compuestos de tipo laminado son especialmente sensibles a los impactos transversales de baja velocidad, puesto que normalmente se producen delaminaciones, un tipo de daño interno que consiste en la falta de continuidad entre dos láminas contiguas provocando que dejen de trabajar solidariamente. Generalmente, éstas no son visibles en la superficie impactada y pueden pasar desapercibidas en una inspección visual, y en estos casos, es necesario recurrir a técnicas de análisis de inspección no destructiva.

Las propiedades de un sistema compuesto después de ser sometido a un impacto pueden disminuir, pudiendo llegar a no cumplir con los requerimientos para los que fue diseñado. Por lo tanto, las industrias que fabrican sus productos con materiales compuestos, necesitan conocer las propiedades mecánicas que poseen estos materiales y el comportamiento que presentan frente a posibles situaciones de impacto, a las que puedan verse sometidos durante su vida en servicio. Además deben conocer, la tolerancia al daño de dichos materiales, es decir, la extensión del daño que puede producirse en ellos y cómo se verán afectadas sus propiedades mecánicas residuales.

Se han llevado a cabo muchos estudios experimentales sobre distintos tipos de materiales compuestos, para poder determinar el desarrollo del daño por impacto, los modos de fallo implicados e identificar los factores que afectan en el proceso. Además, se han desarrollado modelos matemáticos para predecir el daño. El reto es entender el comportamiento mecánico de estos materiales y conocer qué parámetros les afecta ante un impacto, para poder desarrollar sistemas compuestos mejorados y diseñar estructuras resistentes a los impactos. De este modo, se podrá aumentar la fiabilidad de estos materiales, pudiendo llegar en el diseño a sus límites estructurales.

A pesar de la gran cantidad de estudios realizados en el área de los materiales compuestos, la mayoría de ellos se han preocupado de los materiales asociados a la industria aeroespacial, dónde el ahorro en el peso de los materiales es de vital importancia y utilizan materiales de alto coste, como los de fibra de carbono en matriz epoxy. Mientras que se ha prestado muy poca atención al estudio del impacto sobre materiales de menor coste, como los compuestos reforzados con fibras de vidrio E en matriz poliéster, que son utilizados por

ejemplo en la industria naval. El hecho de que no existan los suficientes estudios que permitan comprender el comportamiento frente a impacto de estos materiales, amenaza con restringir su uso en este tipo de industrias, ya que se tiende a aumentar los factores de seguridad frente a un ahorro de peso en las estructuras (Mouritz et al., 2001). Hay que tener en cuenta, que la respuesta al impacto del material es un proceso dinámico muy complejo, en el que interactúan muchos modos de daño, los cuáles dependen de una enorme cantidad de posibles combinaciones de materiales (tipos de fibra y resina, cantidades, arquitecturas, interfases, producción). Además, el impacto por si mismo también se define mediante muchas variables cómo la geometría del percutor y las muestras ensayadas, la velocidad y la energía de impacto (Sutherland et al., 2004).

La mayoría de las investigaciones experimentales y analíticas que existen en la actualidad sobre el estudio de impactos sobre materiales compuestos, se basan en impactos producidos por un único percutor sobre diferentes tipos de materiales, variando la velocidad y energía del impacto. Por lo tanto, existe la necesidad de conocer cómo influye la variación de la geometría de los percutores en impactos de baja velocidad sobre laminados de materiales compuestos.

1.2 OBJETIVOS

El objetivo principal de este proyecto, es analizar la influencia que tiene la geometría del percutor sobre la respuesta obtenida frente a impactos de baja velocidad de un laminado de tejido equilibrado de fibra de vidrio E en matriz poliéster, en función de la energía de impacto utilizada.

En el desarrollo de este proyecto se trabajará con placas, las cuáles se someterán a cargas dinámicas con diferentes tipos de percutores, que varían en geometría y peso. Realizando posteriormente la evaluación y el análisis de los diferentes resultados obtenidos, examinando la extensión del daño y la energía absorbida.

Para poder conseguir obtener el objetivo planteado, se van a desarrollar una serie de objetivos secundarios, los cuales se exponen a continuación:

- Calcular los parámetros más representativos de cada impacto, cómo son la fuerza máxima ejercida sobre las probetas, el desplazamiento máximo del percutor y la energía absorbida.
- Evaluación de los parámetros calculados, en función de la forma y tamaño de los percutores y de la energía de impacto utilizada.
- Evaluación no destructiva, mediante inspección visual para definir la forma y el daño provocado por el impacto, en función de la forma del percutor y la energía de impacto utilizada.

1.3 RESUMEN

Este proyecto se ha estructurado en seis capítulos, los cuáles se presentan a continuación:

En el *capítulo 1*, se recogen los motivos que justifican la realización de este proyecto, se describen los objetivos que se pretenden alcanzar y el contenido del mismo.

En el *capítulo 2*, se presenta una visión general de los materiales compuestos, describiendo tipos de componentes, configuraciones, propiedades, etc. A continuación, se definen los diferentes estudios de impacto, y los posibles modos de fallo de los materiales compuestos. Además, se realiza una recopilación de una serie de investigaciones desarrolladas por diferentes autores sobre la influencia de la geometría de los percutores, tema que se trata en este proyecto. Y por último, se hace una referencia a los diferentes métodos que existen para la evaluación no destructiva de los materiales compuestos.

En el *capítulo 3*, se describe el procedimiento experimental desarrollado durante este proyecto, para la realización de los diferentes ensayos de impactos sobre placas de laminados de material compuesto, así como los equipos, probetas y utillajes utilizados. A continuación, se explica el proceso de tratamiento de los datos que se lleva a cabo mediante el programa de análisis de datos y gráficos, KaleidaGraph. Y por último, se describe la técnica de evaluación no destructiva utilizada para el cálculo de la extensión del área dañada, usando el programa de tratamiento de imágenes, Image-J.

En el *capítulo 4*, se recogen los resultados experimentales obtenidos durante todos los ensayos realizados con los distintos tipos de percutores utilizados, así como los correspondientes análisis de los resultados obtenidos mediante el programa KaleidaGraph.

En el *capítulo 5*, se exponen las conclusiones obtenidas al finalizar el proyecto, y los posibles trabajos futuros que se pueden desarrollar.

Finalmente, en el *capítulo 6*, se presentan las distintas referencias bibliográficas empleadas para la realización del proyecto.

Capítulo 2.

ANTECEDENTES

2.1 INTRODUCCIÓN

Este capítulo, comienza con una clasificación de los diferentes materiales compuestos que podemos encontrar en la actualidad describiendo tipos de componentes, configuraciones, propiedades, etc., y en particular, se recogen las principales características del material que ha sido estudiado para el desarrollo de este proyecto, laminado de tejido de fibra de vidrio E en matriz poliéster. A continuación, se analiza el comportamiento de los materiales compuestos frente a impactos de alta y baja velocidad, realizando una breve recopilación de algunos de los estudios que se han llevado a cabo con anterioridad por diferentes autores, sobre distintas estructuras de laminados sometidos a impactos. Posteriormente, se exponen algunos de los estudios sobre la influencia que tiene la geometría del percutor en los ensayos de impactos. Y por último, se describen los diferentes métodos que existen en la actualidad para la evaluación no destructiva de los materiales compuestos.

2.2 MATERIALES COMPUESTOS

Los dos elementos principales que constituyen un material compuesto son: fibra y matriz. Una combinación adecuada de estos componentes, da lugar a unos materiales con mejores propiedades que las partes que lo componen por separado.

Las primeras matrices poliméricas no aparecieron hasta el siglo XX, y en las primeras décadas se fueron descubriendo las matrices más empleadas hoy en día como las poliéster, fenólicas, las viniléster o las epoxi. Esto se consiguió debido a la necesidad de la industria aeronáutica, de obtener nuevos materiales que permitieran construir elementos estructurales con elevados requerimientos de resistencia y rigidez específica.

Además de fibra y matriz, existen otros tipos de componentes como cargas y aditivos, que dotan a los materiales compuestos de características específicas para cada tipo de fabricación y aplicación. La clasificación de las distintas materias primas que pueden formar parte de un material compuesto, son las que se muestran en la siguiente tabla:

FIBRAS	Fibras Cerámicas (Carburo de Silicio, Alúmina)
	Fibras Metálicas
	Fibras Inorgánicas (Cemento, Geopolímeros, Yeso)
	Fibras Orgánicas (Aramida, Polietileno)
MATRICES	Matrices Inorgánicas (Cemento, Geopolímeros, Yeso)
	Matrices Termoestables (Epoxi, Viniléster, Poliéster, Fenólica, Esteres cianato, Bismaleimidas, Poliimidas, Polieteramida)
	Matrices Termoplásticas (ABS, Polipropileno, Policarbonato, Acetato, PBT, Polieterimida, PET, Nilon, Poliamida, PEEK, PEKK, PAI, PAS)
NÚCLEOS	Nidos de Abeja (Aluminio, Nomex, Polipropileno)
	Espumas (Poliuterano, Poliestireno, PVC)
	Sándwich, Tejido 3D, Madera de Balsa
ADHESIVOS	Epoxi, Poliuterano, Acrílicos
RECUBRIMIENTOS	Cerámicos, Fenólicos, Epoxi+Arena, Intumescentes, Mats

Tabla 1. Componentes de los materiales compuestos. Fuente: Miravete (1990)

2.2.1 Matrices

La matriz es uno de los elementos principales que forma parte de un material compuesto. Entre sus funciones principales podemos citar las siguientes:

- Mantener las fibras en su posición y orientación, por medio de fuerzas de cohesión y adhesión.
- Distribuir los esfuerzos entre las fibras.
- Ofrece resistencia medioambiental protegiendo a las fibras de medios externos, como pueden ser agentes químicos o humedad.
- Protege a las fibras de esfuerzos a compresión.

Las matrices utilizadas en la fabricación de materiales compuestos pueden ser de dos tipos, orgánicas e inorgánicas. En la siguiente tabla, se expone una clasificación de las principales matrices:

INORGÁNICAS	<p><i>CEMENTO, GEOPOLÍMEROS, YESO</i></p> <p><i>MATRICES CERÁMICAS</i></p> <p><i>MATRICES METÁLICAS</i></p>	
	TERMOESTABLES	<p><i>EPOXI, VINILESTER, POLIESTER, FENÓLICA, ESTERES, CIANATO, BISMALEIMIDAS, POLIIMIDAS, POLIETERAMIDA</i></p>
ORGÁNICAS	TERMOPLÁSTICAS	<p><i>POLICLORURO DE VINILO (PVC), COPOLÍMEROS DE ESTIRENO (ABS, SAN), POLIETILENO (PE), POLIPROPILENO (PP), POLICARBONATO (PC), POLIMETACRILATO DE METILO (PMMA), ACETATO, POLIESTIRENO (PS), POLIOXIMETILENO (POM), PBT, POLIETERIMIDA, PET, NYLON, POLIAMIDA, PEEK, PEKK, PAI, PAS</i></p>

Tabla 2. Tipos de matrices de los materiales compuestos. Fuente: Miravete (1990)

2.2.1.1 Matrices orgánicas

Las matrices orgánicas, o también llamadas matrices poliméricas, son las más utilizadas a nivel industrial. En general, son compuestos orgánicos de elevado peso molecular, producto de reacciones de polimerización. Existen dos tipos de matrices poliméricas: termoplásticas y termoestables.

Las matrices poliméricas termoplásticas están constituidas por fuerzas de baja intensidad, las cuales se funden o plastifican con un suministro de calor, es decir, con un incremento de temperatura. Este ciclo de fundición-solidificación se puede repetir indefinidamente. Estas matrices son sólidas a temperatura de proceso y no sufren cambio químico.

Las matrices poliméricas llamadas termoestables, son las resinas más importantes y utilizadas en la construcción de materiales compuestos. Sus fuerzas de unión son muy intensas y permiten obtener una estructura con forma fija permanente. Son líquidas a temperatura ambiente, y deben curarse para alcanzar el estado sólido. No se pueden reciclar debido a que una vez curada, la matriz termoestable, no podrá volver a fundirse sin sufrir una seria degradación, debido a que se endurecen irreversiblemente. Cuando se someten a altas temperaturas se descomponen y se degradan.

2.2.1.2 Resina poliéster

Las resinas de poliéster constituyen la familia más importante de las resinas termoestables utilizadas en los materiales compuestos, ya que se utilizan en más del 90% de los laminados comerciales.

Es la familia de resinas más versátil que existe, ya que pueden ser adaptadas a muchos procesos, para conseguir diferentes prestaciones. Algunas de las características que podemos encontrar en este tipo de resina son:

- Estabilidad dimensional.

- Resistencia a ambientes químicamente agresivos.
- Excelentes propiedades eléctricas.
- Curado de la resina a temperatura ambiente.
- No es necesaria la aplicación de presión para la transformación y el moldeo.
- Posibilidad de moldeo de piezas grandes y complejas a precios competitivos a pequeña y mediana escala de producción.

La configuración y la composición química de la resina de poliéster, va a determinar sus características y propiedades específicas (flexibilidad, dureza, resistencia mecánica, resistencia química, resistencia térmica, etc.). Las características podrán variar en función de los siguientes parámetros:

- **Naturaleza de los constituyentes:** el carácter alifático o aromático, del número de carbonos, del número de grupos éteres y del isómero que lo constituya.
- **Proporciones de los constituyentes:** porcentaje del monómero y grado de insaturación del monómero.

Dependiendo de la combinación que hagamos de los parámetros anteriores, será posible variar las características de la resina utilizada. Por ejemplo, utilizando cadenas alifáticas largas se conseguirán unas resinas más flexibles que en el caso de cadenas cortas, además, su resistencia a la temperatura será mucho más baja pero tendrá una mejor resistencia al choque. Otro ejemplo, es en el caso de que se utilicen ciclos aromáticos, estos nos aportarán rigidez, mejores propiedades a temperaturas más elevadas y una mayor resistencia química. Debido a esta propiedad, podremos conocer las características que tendrá una determinada resina conociendo a todos sus constituyentes y recíprocamente, conocer cuáles tendrían que ser los constituyentes de una determinada resina para poder poseer unas características determinadas.

Las resinas de poliéster, se van a clasificar en función de sus diferentes constituyentes base en los siguientes tipos:

TIPOS	APLICACIONES
Ortoftálicas	Barcos, placas onduladas y planas.
Isoftálicas	Depósitos, ingeniería química.
Tereftálicas	Ingeniería química.
Tetraftálicas	Depósitos para alimentos, cubas.
Bisfenólicas	Aplicaciones anticorrosión.
Resinas de Tetracloroftálico	Comportamiento a fuego moderado.
Resinas de ácido HET	Resistencia al fuego, anticorrosión.
Resinas de metracrilato metilo	Piezas, cúpulas.

Tabla 3. Tipos de resinas de poliéster. Fuente: Miravete (1990)

Durante el proceso de fabricación y moldeo de los laminados, las resinas de poliéster se suministran en forma de líquido viscoso, que con la adición de productos químicos (acelerantes, catalizadores, etc.) adecuados, se transforman de un estado líquido a un estado sólido. Una vez la resina ha alcanzado su estado sólido, no podrá ser transformada nuevamente a estado líquido.

2.2.2 Refuerzos

El refuerzo es el principal componente para soportar las cargas, y va a determinar las principales propiedades mecánicas del material compuesto, aportando resistencia mecánica, rigidez y dureza. Los tipos de fibra de refuerzo se pueden clasificar según su origen. Las fibras pueden ser de origen mineral y de origen orgánico, según se expone en la siguiente tabla.

FIBRAS DE ORIGEN MINERAL	Fibras Cerámicas (Carburo de silicio, aramida)
	Fibras Metálicas
	Fibras de origen inorgánico (Carbono, vidrio, boro)
FIBRAS DE ORIGEN ORGÁNICO	Aramida, Polietileno

Tabla 4. Tipos de fibras. Fuente: Miravete (1990)

Las características más importantes que se deben tener en cuenta a la hora de seleccionar las fibras de los materiales compuestos son: la densidad, el coste, su resistencia a la tracción específica y su módulo específico.

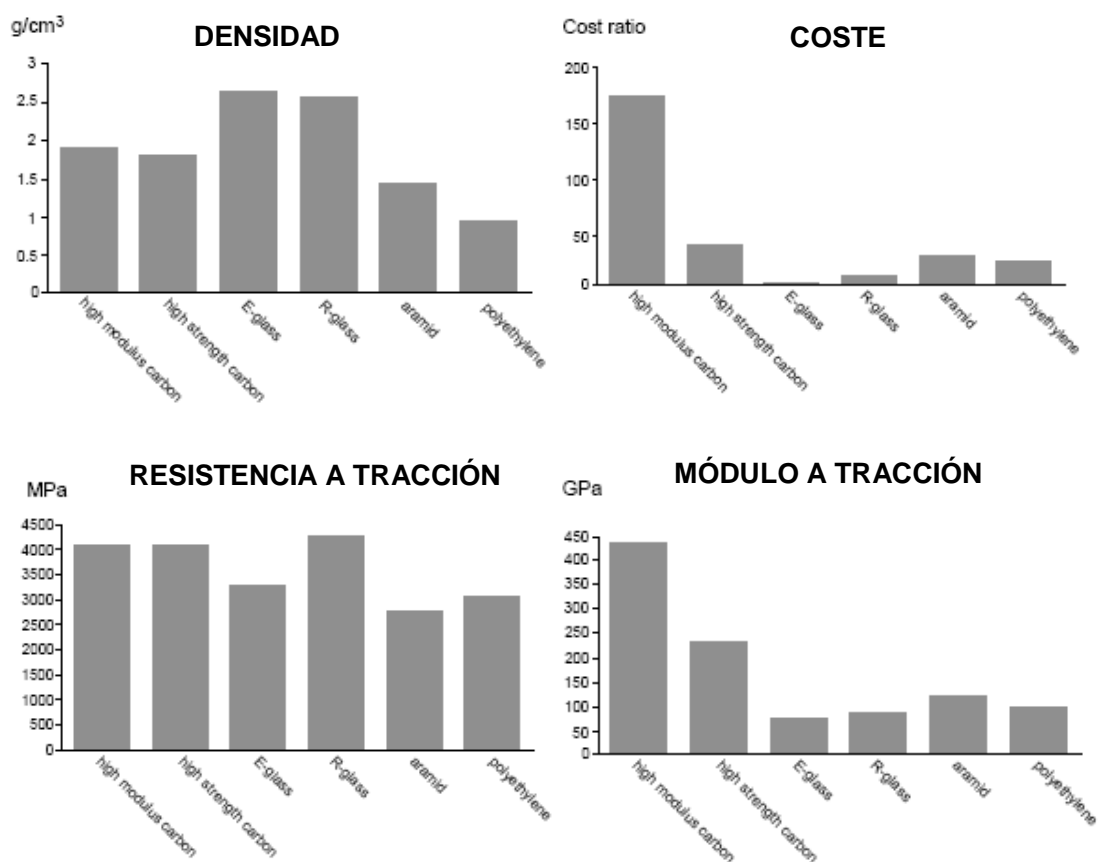


Figura 3. Propiedades principales de las fibras. Prepreg Technology. Hexcel

Las fibras de refuerzo son estructuras tenaces, rígidas y resistentes a altas temperaturas. Pero su principal inconveniente es su fragilidad, es decir, un defecto interno o fisura externa puede dar lugar a la rotura de la fibra mucho antes de que ésta alcance su máxima resistencia. Por ello, es necesario utilizar las matrices para que fijen su posición y las protejan de agresiones externas.

2.2.2.1 Fibra de vidrio

La fibra de vidrio se remonta a la época de los egipcios, quiénes descubrieron sus virtudes de resistencia para armar vasos y ánforas, en las tumbas de los faraones. Las fibras tejidas, datan del siglo XVIII en Francia y la producción de fibra de vidrio continua se consiguió en 1938 en Estados Unidos. Los primeros estudios ingenieriles sobre materiales compuestos, fueron realizados sobre materiales compuestos de fibra de vidrio, y hoy en día es uno de los refuerzos más utilizados en distintas aplicaciones industriales, debido a su bajo coste, su alta disponibilidad, la simplicidad de los procesos productivos asociados y sus buenas propiedades mecánicas. En cambio, para usos aeroespaciales, su bajo módulo de elasticidad y elevada densidad, hacen que sean poco eficientes con respecto a otras fibras como las fibras de carbono o aramidas.

Propiedades

- Alta adherencia fibra-matriz, gracias a los recubrimientos apropiados para la mayoría de las matrices orgánicas.
- Alta resistencia mecánica específica (tracción/densidad), es incluso mayor que la del acero.
- Buen aislante eléctrico, incluso en espesores reducidos. Tiene buena permeabilidad eléctrica y electromagnética.

- Incombustibilidad, ya que sus componentes son minerales, por lo que no propaga la llama y no produce calor, humos o toxicidad.
- Alta estabilidad dimensional, ya que presenta un bajo coeficiente de dilatación térmica, lo que le hace poco sensible a los cambios térmicos e higrométricos.
- Compatibilidad con las materias orgánicas. Presenta una buena disposición a recibir diferentes ensimajes, creando puentes de unión entre la fibra y la matriz, que le permite asociarse a numerosas resinas sintéticas y matrices minerales.
- Inerte a la acción biológica por lo que no sufre alteraciones y no se pudre.
- Baja conductividad térmica. Se utiliza en la construcción para poder prescindir de puentes térmicos y conseguir un considerable ahorro de energía.
- Estabilidad química, por lo que con una resina apropiada se pueden obtener compuestos resistentes a agentes químicos.

2.2.2.2 Fibra de vidrio E

Existen diversos tipos de fibras de vidrio que se fabrican en la actualidad (E, A, AR, R o S, D, B, ERC, y X), siendo la fibra de vidrio “E”, la más utilizada en la fabricación de materiales compuestos. Ésta representa casi la totalidad del vidrio textil utilizado, más del 90% de los refuerzos en materiales compuestos.

La fibra de vidrio E, es de uso general ya que ofrece la suficiente resistencia mecánica a un bajo precio, y además, tiene buenas propiedades eléctricas. La composición química de la fibra de vidrio E se muestra en la siguiente tabla:

CONSTITUYENTE	% EN PESO
Sílice (SiO_2)	53-54
Alúmina (Al_2O_3)	14-15,5
Cal (CaO)	20-24
Óxido de magnesio (MgO)	
Óxido de boro (B_2O_3)	6,5-9
Flúor (F)	0-0,7
Óxido de sodio (Na_2O)	< 1
Óxido de circonio (ZrO_2)	
Óxido de potasio (K_2O)	
Óxido de hierro	

Tabla 5. Composición de la fibra de vidrio E. Fuente: Antequera et al. (1991)

Propiedades

En la tabla que se muestra a continuación, aparece los valores de las principales propiedades mecánicas de la fibra de vidrio E.

PROPIEDADES MECÁNICAS	
Módulo de elasticidad (GPa)	75
Resistencia a tracción (GPa)	3,5
Densidad (Kg/m^3)	2,85
Resistencia a compresión (GPa)	> 0,8
Módulo de torsión (GPa)	28
Deformación a rotura (%)	4

Tabla 6. Propiedades de la fibra de vidrio E. Fuente: Miravete (1990)

Fabricación

Existen varios modos que conducen a la producción de fibras de vidrio pero, en general, se basan siempre en el mismo procedimiento, en el que podemos distinguir las siguientes fases:

1. *Composición-fusión*: una mezcla homogénea del material se calienta en un horno de fusión (1550°C).
2. *Fibrado*: El vidrio fundido es distribuido por canales e hileras, a unos 1250°C que permite su colada por gravedad, dando origen a barras de algunas décimas de μm de diámetro. A la salida de la hilera, el vidrio se estira a gran velocidad, entre 10 y 60 m/s y se enfría, primero por radiación y después, por pulverización de agua.
3. *Ensimado*: Revestimiento a la salida de la hilera de los filamentos con una fina película (ensimaje), constituida por una dispersión acuosa de diversos compuestos químicos. La cantidad de ensimaje que se deposita sobre el vidrio es relativamente baja (entre el 0.3 y el 3%). Cada aplicación necesitará una combinación específica adaptada a su uso final. Las funciones del ensimaje son las siguientes:
 - Dar cohesión entre filamentos.
 - Hacer aumentar o disminuir la rigidez.
 - Proteger contra la abrasión.
 - Eliminar la electricidad estática.
 - Modular la impregnación por la resina.
 - Favorecer la unión vidrio-resina.
4. *Bobinado*: Sirve para agrupar al conjunto de filamentos, que se bobinan según diferentes formas y geometrías.
5. *Secado*: Se elimina el exceso de agua en que se había disuelto el ensimaje.



Figura 4. Fibra de vidrio. www.nauticaescalada.com

2.2.3 Laminados

Los laminados de materiales compuestos, se forman a partir del apilamiento de distintas láminas, cada una de las cuales está formada por una capa de resina de pequeño espesor (matriz) reforzada con algún tipo de fibras. Existen dos tipos de láminas, de cinta o de tejido.

2.2.3.1 Láminas de cinta

En las láminas de cinta las fibras se encuentran orientadas en una única dirección y presentan isotropía transversal, es decir, mantienen las mismas propiedades en las direcciones perpendiculares a las fibras. Pueden formar diferentes tipos de laminados dependiendo del apilamiento de láminas.

- *Laminados unidireccionales*: apilamiento de láminas de cinta con sus fibras orientadas en la misma dirección.
- *Laminados ortótropos*: apilamiento de láminas de cinta con las fibras orientadas en direcciones ortogonales.
- *Laminados cuasi-isótropos*: apilamiento de láminas de cinta orientadas en diferentes direcciones (0° , 90° , $\pm 45^\circ$). Las propiedades se consideran las mismas en todas las direcciones.

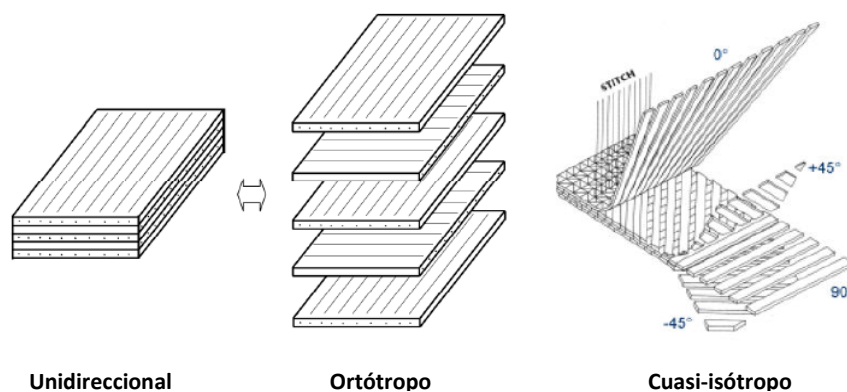


Figura 5. Tipos de laminados con láminas de cinta. Prepreg Technology. Hexcel

2.2.3.2 Láminas de tejido

En las láminas de tejido, las fibras se encuentran orientadas en dos direcciones perpendiculares entre sí y se denominan, trama y urdimbre. La urdimbre son las fibras longitudinales y se encuentran entrelazadas por fibras transversales, a las que se les denomina trama. Estas fibras siguen una determinada secuencia de enlazado, para formar distintos tipos de láminas de tejido variando dicha secuencia, y el porcentaje de fibras en cada dirección.

- *Tafetán*: Las fibras de urdimbre y de trama se entrecruzan alternativamente, existiendo en el tejido un 50% de fibra en cada dirección.
- *Satén*: Las fibras de urdimbre y de trama están entrelazadas según un orden y una frecuencia, a fin de obtener un aspecto unido, no estando los puntos de ligadura dispuestos en orden. En una cara del tejido predominan las fibras de urdimbre y en la otra las de trama.
- *Sarga*: Las fibras de urdimbre y de trama están entrecruzadas según un orden y una frecuencia, a fin de obtener líneas diagonales características de este tejido.

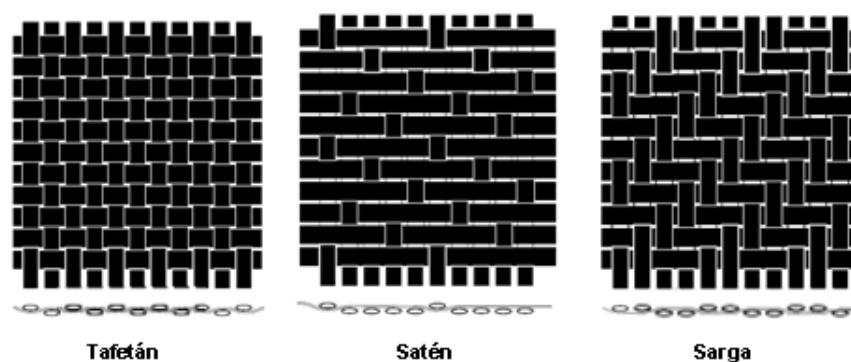


Figura 6. Tipos de láminas de tejido. Prepreg Technology. Hexcel

El tejido de tipo tafetán es un tejido equilibrado que tiene un 50% de fibra de cada una de las direcciones. La principal característica de este tipo de tejido es la uniformidad en las propiedades mecánicas de las dos direcciones, 0° y 90° . Se trata de la configuración más utilizada, y es la que se ha utilizado en este proyecto.

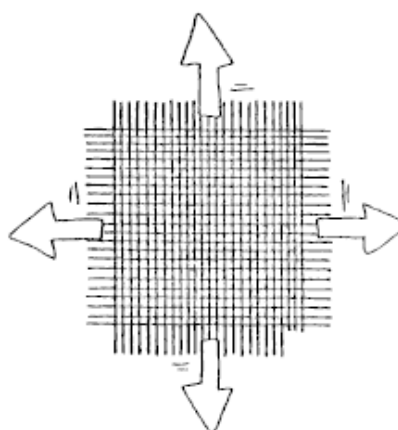


Figura 7. Representación de fuerzas en una lámina de tejido equilibrado.
www.hexcel.com

2.2.3.3 Métodos de fabricación

Actualmente, existen varias técnicas industriales para la fabricación de láminas de tejido, en las que se realiza un proceso que se denomina preimpregnado (prepreg). Este proceso está basado en la incorporación de la resina o matriz con el material de refuerzo mediante una máquina de impregnación. Durante el proceso, se alinea el material de refuerzo y se incorpora la matriz, combinándose mediante la aplicación de calor y presión.

El producto final preimpregnado se colocará sobre unos papeles separadores que protegen y facilitan el manejo del material. La presentación del producto final dependerá de la manejabilidad de los tejidos utilizados como refuerzo, y la facilidad de impregnación que tengan para mantener adecuadamente unida a la resina hasta que se termine el proceso de curación.

El tejido en forma de tafetán que es el que se ha utilizado, posee la menor capacidad de impregnación en comparación las demás configuraciones de tejido debido al alto nivel de engarzamiento de sus fibras.

a) *Técnica en dos pasos:*

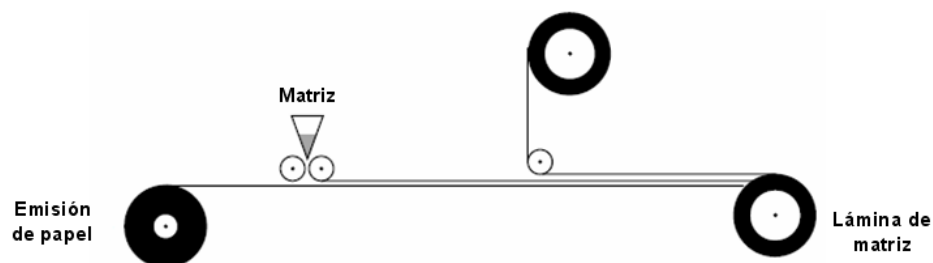


Figura 8. Primera etapa de un proceso de fabricación de materiales preimpregnados. www.hexcel.com

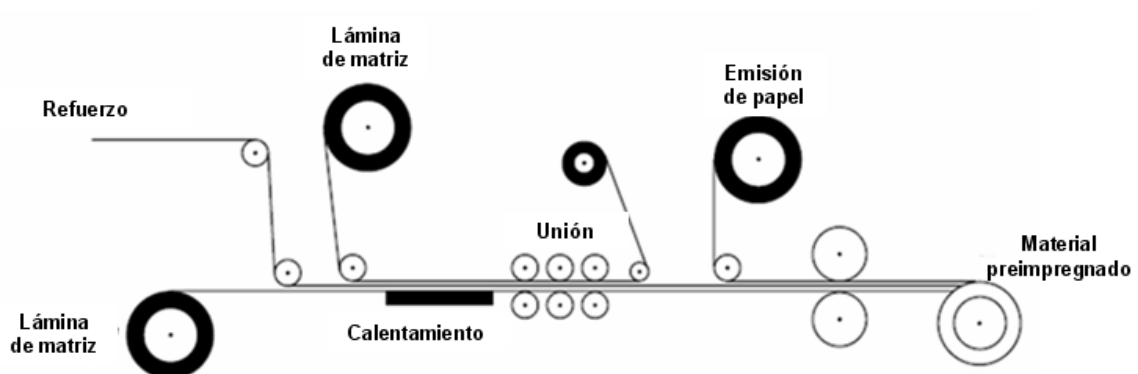


Figura 9. Segunda etapa de un proceso de fabricación de materiales preimpregnados. www.hexcel.com

b) Torre vertical:

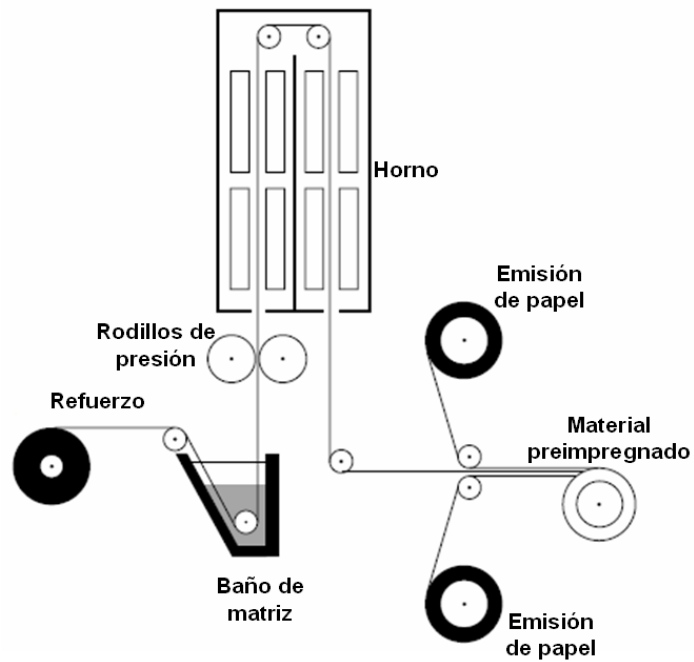


Figura 10. Proceso de fabricación de materiales preimpregnados en una torre vertical. www.hexcel.com

c) Torre horizontal:

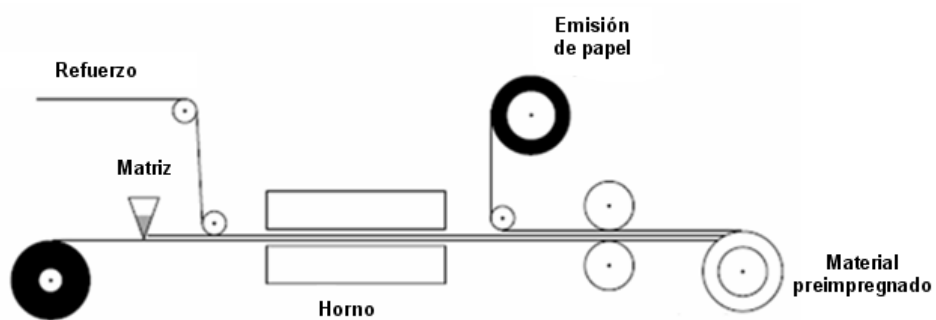


Figura 11. Proceso de fabricación de materiales preimpregnados en una torre horizontal. www.hexcel.com

2.3 ESTUDIOS DE IMPACTOS

En una estructura de material compuesto, de todas las causas que pueden producir daños en ella, el impacto es generalmente reconocido como la condición de carga más severa (Hawyes et al., 2001). Esto es debido a que la mayoría de los materiales compuestos son frágiles y por tanto, solo pueden absorber energía mediante deformación elástica y a través de mecanismos de daño (rotura de fibra, rotura de matriz, delaminación).

Las estructuras fabricadas con material compuesto se ven expuestas a diversos tipos de impactos durante su vida en servicio (Abrate et al., 1998). Estos impactos pueden ser desde la caída de una herramienta durante las operaciones de montaje o mantenimiento, al impacto en la carcasa de los motores de los aviones durante el vuelo, el aterrizaje o el despegue, y al impacto de basura espacial en las estructuras de los vehículos espaciales, o de satélites en órbita (Shoepner y Abrate et al., 2000). Debido a que existen distintos tipos de impactos, tradicionalmente se han distinguido entre impactos de baja velocidad e impactos de alta velocidad, aunque no hay una clara transición entre ellos y los autores no se ponen de acuerdo en sus definiciones.

Los ensayos dinámicos que se realizan, tratan de simular las posibles situaciones reales a las que pueden estar sometidos los distintos componentes de una estructura. En el caso de los ensayos de baja velocidad, tratan de simular el impacto que produce la colisión de un objeto de masa considerable con una baja velocidad contra la estructura. Un ejemplo, sería la caída de una herramienta sobre la estructura durante la fabricación, el mantenimiento o en las condiciones de servicio. Por otro lado, en los ensayos de alta velocidad, se busca simular el impacto que produce la colisión de una masa pequeña, con una velocidad elevada, como en el caso del impacto que se puede producir durante el vuelo, aterrizaje o despegue de los aviones, pequeñas piedras u otros objetos presentes en la pista pueden ser arrojados por los neumáticos contra la estructura.

Normalmente, los ensayos de impacto solo se realizan sobre elementos representativos de componentes y no de la estructura completa. En el caso del análisis del comportamiento de materiales compuestos, se suelen utilizar probetas en forma de placas de distintos tamaños, formas y espesores dependiendo del tipo de ensayo.

2.3.1 Impactos a alta velocidad

Una de las definiciones más aceptadas para un impacto de alta velocidad, explica que se produce un impacto de este tipo, cuando el ratio entre la velocidad de impacto frente a la velocidad de propagación de las ondas de compresión a lo largo del espesor es mayor que la deformación de rotura en dicha dirección (Abrate et al., 1998). Esto implica que el daño se produce durante los primeros recorridos de las ondas de compresión, antes de que se produzca una deformación global de la estructura y por tanto, no tienen importancia las condiciones de contorno que existan puesto que sólo se produce un daño localizado.

Sjöblom et al.1998 y Shivakumar et al.1985, expusieron que la respuesta a impactos de alta velocidad es dominada por una propagación de ondas de esfuerzo a través del material, a las que la estructura no tiene tiempo de responder, dejando un daño muy localizado. Los efectos de las condiciones de contorno pueden ser ignorados, debido a que el impacto termina antes de que las ondas del esfuerzo hayan alcanzado el borde de la estructura.

Liu y Malvern et al.1987 y Joshi y Sun et al.1987, sugirieron que el tipo de impacto podía ser clasificado de acuerdo con el daño producido, especialmente si el daño es la principal preocupación. Los impactos de alta velocidad se caracterizan por la penetración y la rotura de fibras inducidas, delaminación y deformación elástica en el entorno de la zona de impacto.

Existe un gran número de estudios que evalúan el comportamiento frente a impacto de los materiales compuestos (Cantwell y Morton et al., 1991), pero los estudios de impactos a altas velocidades sobre materiales compuestos son pocos en comparación con los realizados a bajas velocidades de impacto (Kasano et al., 1999). Los ensayos experimentales a altas velocidades de impacto, se realizan en un cañón de gas con proyectiles de diferentes formas y tamaños (Cantwell y Morton et al., 1991, Keisuke et al., 2002 y Nunes et al., 2004). Estos impactos producen unos efectos que se localizan en la zona de alrededor de dónde se produce el impacto. Esto es debido a la corta duración que tiene este fenómeno.

Algunos de los aspectos que se pueden estudiar mediante los ensayos de alta velocidad son: el límite balístico, la velocidad residual, la energía de perforación y el modo de fallo (Kasano et al., 1999).

Límite balístico: se define como la velocidad por debajo de la cual, un proyectil específico no perfora las probetas que son impactadas.

Velocidad residual: velocidad con la cual el proyectil atraviesa la probeta y sale de ésta. A partir de la velocidad residual se puede determinar la energía absorbida por la probeta.

Energía de perforación: se define como la energía mínima necesaria para provocar perforaciones en una estructura con impactos de alta velocidad. Se puede calcular experimentalmente a partir de la velocidad de impacto más baja con la que se logra atravesar las probetas, la cual depende ligeramente de la forma del proyectil utilizado y en mayor medida del espesor del laminado (Ulven et al., 2003).

Modo de fallo: en los materiales compuestos la perforación es el producto que se genera en un impacto balístico. Depende de la forma del proyectil (Abrate et al., 1998), y se encuentra relacionado con la energía de perforación. El fallo de los materiales sometidos a ensayos de alta velocidad se producen en la zona cercana al impacto, y pueden intervenir diferentes mecanismos de fallo: delaminación, rotura de matriz y rotura de fibras.

En general, los ensayos de alta velocidad producen perforaciones, que constituyen un factor crítico en la integridad de los elementos estructurales, y que pueden afectar a la vida en servicio de los equipos diseñados con materiales compuestos (Abrate et al., 1991). La perforación es un modo macroscópico de fallo, y ocurre cuando el fallo de la fibra alcanza una extensión crítica permitiendo que el percutor penetre completamente en el material (Lee et al.1991).

2.3.2 Impactos a baja de velocidad

Los impactos de baja velocidad suelen ser producidos por la colisión de un objeto de masa considerable contra una estructura, y éstos pueden ocurrir durante la fabricación, el mantenimiento o en condiciones de servicio. Los daños producidos se deben a golpes de herramientas, cajas de herramientas y/o equipamiento de trabajo sobre la superficie de la estructura debido a descuidos. Del mismo modo que para los impactos de alta velocidad, existen varias definiciones propuestas por distintos autores para los impactos de baja velocidad, entre ellas se van a destacar las siguientes:

Sjöblom et al.1998 y Shivakumar et al.1985, definieron los impactos de baja velocidad como los sucesos que pueden ser tratados como cuasi-estáticos, y su límite superior puede variar de 1 a 10 m/s, dependiendo de la rigidez de la muestra, las propiedades del material, la masa y la rigidez del percutor. En impactos de baja velocidad, la respuesta dinámica estructural de la muestra es tan importante como que la duración del contacto sea lo suficientemente larga como para hacer que toda la estructura responda al impacto, y en consecuencia, se absorba mayor energía sea elásticamente.

Liu y Malvern et al.1987, y Joshi y Sun et al.1987 sugirieron que el tipo de impacto podía ser clasificado de acuerdo con el daño producido, especialmente si el daño es la principal preocupación. Los impactos de baja velocidad están caracterizados por la delaminación y la rotura de la matriz.

Cantwell y Morton et al.1991, clasificaron los impactos de baja velocidad como los ensayos realizados por encima de 10m/s, considerando las técnicas de prueba que generalmente se utilizaban en las simulaciones de impacto, mientras que Abrate et al.1991, señaló que los impactos de baja velocidad se producen para velocidades de impacto de menos de 100 m/s. Debido a la larga duración de estos impactos, las ondas de tensión que se generan, se van a propagar hasta el contorno del elemento y se van a reflejar varias veces durante el impacto. Esto hace que la respuesta de la estructura sea global y que influya tanto en su geometría como en sus condiciones de contorno.

En la actualidad, lo que menos se comprende y es más difícil de determinar, son los modos de fallo que se inducen en los materiales compuestos, cuando se someten a diferentes cargas de impacto a baja velocidad. Es muy importante identificar estos modos de fallo, ya que con ello se obtendrá información sobre el proceso de impacto, además de la interacción entre los distintos modos de fallo implicados, que servirá para poder comprender el modo de iniciación y propagación de los daños (Cantwell y Morton et al.1991).

Los compuestos reforzados con fibras, cómo el que se ha utilizado en el proyecto, constan de dos componentes principales, fibras y matriz, además de la región de la interfase que es la zona de unión entre ambas. Las propiedades de estos componentes, tienen un efecto distinto sobre la resistencia al impacto, y sobre los umbrales de energías o a las tensiones requeridas para iniciar los modos de fallo inducidos por el impacto. Normalmente, el módulo elástico de las fibras es mucho mayor que el de la matriz, por lo que las fibras parecen ser esencialmente rígidas, y no tener ningún efecto sobre la rotura de la matriz y las delaminaciones. Pero a ciertos niveles de energía de impacto, las propiedades de las fibras llegan a ser importantes, ya que son el principal componente que soporta las cargas en los laminados reforzados con fibras, y por tanto, el daño en las fibras puede reducir de forma severa la fuerza y la rigidez de un laminado. Por ello, se considera como parámetro fundamental para resistir los impactos de baja velocidad, a la capacidad que poseen las fibras de almacenar la energía elásticamente (Cantwell et al.1991).

Los compuestos laminados reforzados con fibras cómo el que se ha utilizado para realizar este proyecto, se denominan bidimensionales (2D) debido a que la orientación de las fibras de refuerzo es plana. La falta de refuerzo en la dirección del espesor (transversal), conlleva que las solicitaciones fuera del plano sean soportadas únicamente por la matriz. Por este motivo, estos materiales son conocidos por ser altamente susceptibles a daños internos causados por impactos transversales debido a la falta de resistencia a través del espesor. Además, los impactos de baja velocidad se consideran muy peligrosos en este tipo de materiales, ya que se pueden originar daños sobre la superficie de impacto o por debajo de la misma, y producir delaminaciones en el material que no son detectadas por inspección visual, y pueden reducir significativamente las propiedades residuales de material (Xiong et al., 1995 y Reis y Freitas 1997). Este hecho podría tener como consecuencia que componentes de estructuras con daños de consideración, continúen en servicio. Por lo que es necesario realizar

estudios, que ayuden a determinar qué posibles efectos pueden tener los impactos de baja velocidad sobre este tipo de materiales compuestos.

La reducción de la capacidad de los laminados, a menudo puede ser estimada conociendo el tamaño y la localización del daño, junto con el tipo de carga a la que está sometido el laminado. Sabemos que el material utilizado en este proyecto, compuesto de tejido de fibra de vidrio E en matriz polimérica, están siendo ampliamente empleado en la industria naval y en industrias como la química y la construcción, para la fabricación de tuberías y depósitos de almacenaje, y por tanto, se conoce el tipo de cargas a las que pueden ser sometidos: contactos contra el muelle, colisión con desechos flotantes, impactos de herramientas, etc., siendo todos ellos impactos de baja velocidad. Es prácticamente imposible reproducir todas las posibles situaciones de impactos que pueden ocurrir, mediante ensayos experimentales. Por lo que se considerará al caso de un impacto central y transversal sobre una placa sujeta a baja velocidad, como el impacto más perjudicial al que puede ser sometido el material.

Para poder determinar los modos de fallo que se inducen en los materiales compuestos mediante estudios experimentales, se han utilizado equipos como la torre de caída libre, el péndulo Charpy y la barra Hopkinson. Siendo la torre de caída, el dispositivo experimental más utilizado para reproducir impactos de baja velocidad sobre materiales compuestos.

Sutherland y C. Guedes Soares (2004), realizaron un estudio experimental para investigar la respuesta al impacto de muestras de laminados de tejido con refuerzo de vidrio-E en matriz poliéster, sobre placas con diferentes espesores y pesos de fibras. Los ensayos se realizaron en una torre de caída de peso, con placas rectangulares de 100x150mm, utilizaron un percutor de acero, cilíndrico y semiesférico de 20mm de diámetro, en un rango de energías de impacto de 0,5 a 190 J. Encontraron una progresión común de tres estadios de daño con el aumento de la energía incidente de daño: “sin delaminación”, “delaminación” y “daño de fibra”. Para un pequeño valor límite aparecía una delaminación interna central y circular. A medida que las delaminaciones aumentaban, se producían pequeñas deformaciones de las fibras en las capas superiores, una penetración permanente bajo el percutor y rotura de la matriz. Esta rotura para los laminados más finos de aproximadamente 3mm de espesor, se producía en la cara posterior al impacto, y en caso de laminados más gruesos de hasta 9mm, la rotura de la matriz se producía en la cara superior. Las delaminaciones internas pasaron de

tener una forma rectangular o de diamante, a una forma irregular, a medida que aumentaba la energía de impacto.

2.4 MODOS DE FALLO

Los materiales compuestos sometidos a impactos de baja velocidad, en general, pueden fallar en una amplia variedad de modos. Para estos tipos de impactos que no dan como resultado una penetración completa de la muestra, los experimentos realizados indican que los modos de fallos consisten en daños en la matriz, como deformación y micro-roturas en la misma, separación interfacial y rotura de la lámina, delaminaciones y rotura de fibras. Adicionalmente, el contacto del percutor sobre la placa durante el impacto induce el aplastamiento de las capas superiores, y puede ser otro posible daño.

2.4.1 Daños en la matriz

La rotura de matriz es el primer tipo de fallo que sucede en los materiales compuestos como producto de un impacto de baja velocidad. Este tipo de fallo es inducido por impactos transversales, que generan en el material una concentración de tensiones provocando la deformación y micro-roturas en la matriz que al aumentar, dan lugar a una fisura localizada que se propaga por la matriz. Durante esta fase del proceso del daño que consiste en la rotura de la matriz y la curvatura de fibras, no se produce una reducción importante en la fuerza residual.

Por lo general, la rotura de la matriz genera la separación entre la fibra y la matriz, debido a las distintas tensiones de tracción, compresión o flexión que aparecen. Normalmente, las roturas de la matriz están orientadas en planos paralelos a la dirección de las fibras del material impactado. Existen dos tipos de rotura de matriz: roturas de cortadura y roturas por flexión.

Las roturas de cortadura (Choi et al.1991), se forman debido a un gran esfuerzo de corte transversal a través del material. Estas roturas de matriz, en las capas superiores e

intermedias de un laminado, comienzan debajo de los bordes del percutor (Joshi y Sun et al.1985), y tienen una inclinación de aproximadamente 45° cómo se puede observar en la figura 12. Estos esfuerzos de corte transversal están relacionados con la fuerza y el área de contacto durante el impacto.

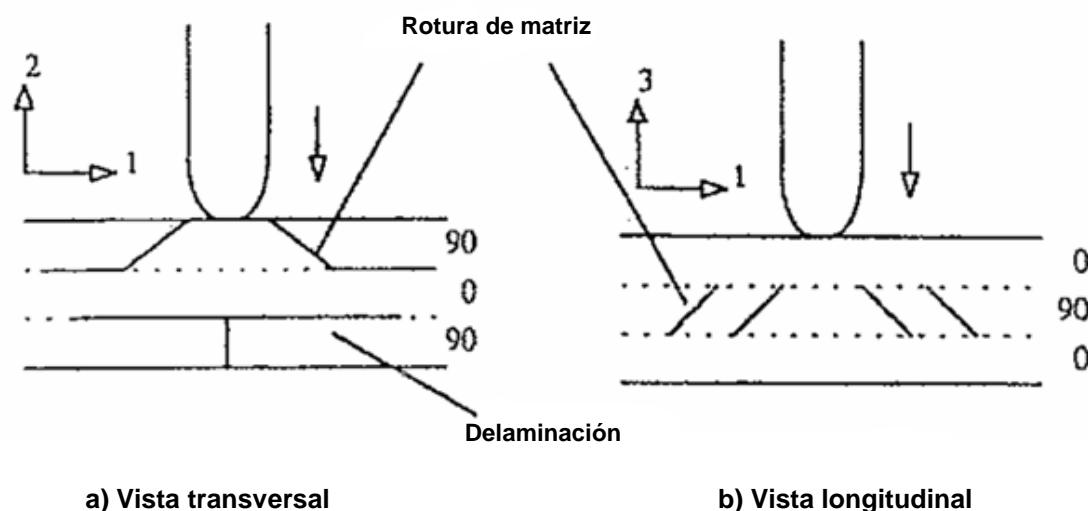


Figura 12. Iniciación del daño en una placa impactada de material compuesto 0/90/0. Review of low-velocity impact properties of composite materials, 1996.

La rotura en la capa inferior del laminado, se denomina rotura por flexión, ya que es inducida por altos esfuerzos de flexión a tracción, y cómo se puede observar en la figura 12 (a), este tipo de rotura de matriz es característicamente vertical. El esfuerzo de flexión está estrechamente relacionado con la deformación a flexión del laminado. Lee y Sun et al.1993, llegaron a las mismas conclusiones en sus análisis.

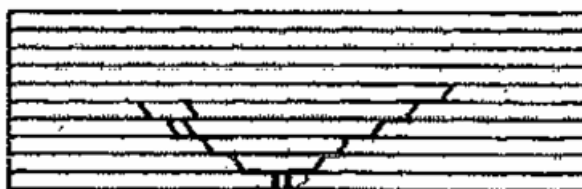
Según Cantwell y Norton et al.1989, el tipo de rotura de matriz que se genera depende de la estructura global de las muestras impactadas. En muestras delgadas y flexibles, se generan roturas de matriz sobre la cara opuesta al impacto. Estas roturas resultan al ser sometidas a una excesiva flexión y a los esfuerzos sobre la matriz, que inducen grandes fuerzas de tensión sobre

el lado opuesto del laminado. Estos esfuerzos pueden dar como resultado la separación o rotura de las fibras. Las roturas resultantes se propagan hacia arriba e inician delaminaciones en las interfases de la lámina dando lugar a una forma de daño con aspecto de pino invertido, cómo se muestra en la figura 12 (b).

Cuanto más gruesas son las láminas menos flexibles son, y por tanto aumenta su rigidez. Normalmente, desarrollan roturas de matriz sobre la cara impactada, siendo estas roturas el resultado de las elevadas fuerzas de contacto inducidas y localizadas cerca del la cabeza del percutor, que originan en la primera capa impactada roturas de cortadura transversal debajo del percutor. Estas roturas se propagan verticalmente hacia abajo a través de las capas, e inician delaminaciones cuando alcanzan las interfases de las láminas y dando lugar a una forma de pino 13 (a).



a) Pino



b) Pino invertido

Figura 13. Forma de daño: a) Pino, b) Pino invertido (Abrate, 1998)

Según Sjöblom et al.1988, se generan muchas roturas de matriz en el material después de un impacto y es imposible detectarlas por inspección visual, pero éstas no contribuyen significativamente en la reducción de las propiedades residuales del laminado ensayado. De todas formas, los puntos de rotura de matriz de un laminado, actúan como puntos de iniciación de las delaminaciones y las roturas de las fibras, y éstas si pueden cambiar la rigidez

local o global del compuesto y por tanto, el efecto en la respuesta del material en la curva carga-tiempo (Herup et al.1997).

2.4.2 Delaminación

Una delaminación es la rotura que se produce por la propagación de las fisuras a través de la matriz, y que da lugar al despegue entre láminas adyacentes con una orientación diferente de las fibras (Wu et al.1988). Estudios experimentales informan consistentemente, que las delaminaciones ocurren solo en interfases entre láminas con diferente orientación de fibras, si dos láminas adyacentes tienen la misma orientación de fibras, no se producen delaminaciones en la interfase entre ellas.

En un impacto de baja velocidad, una buena parte de la energía de impacto es utilizada en la producción de este tipo de fallo, (Abrate et al.1998). Son los daños más críticos ya que reducen significativamente la fuerza del laminado, y en muchas ocasiones no son visibles en la superficie impactada pudiendo pasar desapercibidos en una inspección visual de rutina. En muchas situaciones (Delfosse et al., 1995), el nivel de impacto para el cual se produce un daño visible, es mucho mayor que el nivel que produce una pérdida significativa de propiedades mecánicas. Además, las delaminaciones pueden crecer durante la vida en servicio de la estructura.

Liu (1988), explicó que la delaminación era el resultado de un desajuste en la rigidez de flexión entre capas adyacentes, y dedujo experimentalmente que las áreas de delaminación para un laminado impactado en su cara superior, eran generalmente formas oblicuas con el mayor de sus ejes orientado en la dirección de las fibras de la lámina de la capa inferior de la interfase. Para laminados de 0/90, la forma llegó a ser la de un cacahuete. Cuánto mayor sea el desajuste, 0/90 es el peor caso de orientación de fibra, más grande será el área de la delaminación. Además, cómo demostraron los experimentos y análisis, afirmó que los esfuerzos de flexión inducidos son la causa principal de formación de las delaminaciones. A lo largo de la dirección de las fibras la lámina tiende a doblarse de forma cóncava, mientras que en la dirección transversal lo hace de forma convexa. La forma y el tamaño de las delaminaciones

también dependen de otros factores como son las propiedades del material, la secuencia de apilamiento y el espesor del laminado, Finn et al.1993.

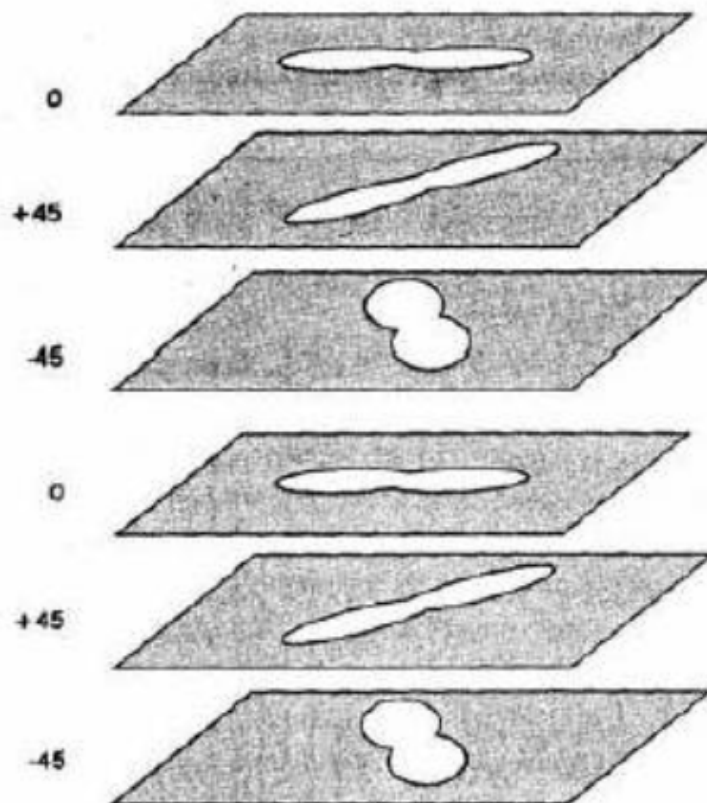


Figura 14. Orientación y forma de las delaminaciones. Abrate (1998)

Iniciación de la delaminación e interacción con la rotura de la matriz

Joshi y Sun et al.1985, estudiaron la interacción entre la delaminación y la rotura de la matriz, para laminados 0/90/0 sometidos a impactos transversales. Concluyeron que cuando una grieta de cortadura inclinada en la matriz de la capa superior alcanza la interfase, se detiene por el cambio de orientación de las fibras y se propaga entre las capas como una delaminación. La grieta de flexión vertical está pensada para iniciar la delaminación en la

interfase más baja. La rotura de la matriz que lleva a la delaminación se conoce como rotura crítica de matriz.

Según Choi et al.1991, la delaminación causada por impacto transversal solo ocurre después de que se haya alcanzado el umbral de energía, y se ha observado que la delaminación solo ocurre en presencia de una rotura de matriz. El valor umbral de la energía cinética es difícil de determinar experimentalmente, debido a que son necesarios muchos ensayos experimentales para determinar el nivel de energía requerida para iniciar la delaminación.

Liu et al.1993, mostró que tanto las roturas por flexión como las de cortadura, podían iniciar delaminaciones. La diferencia entre ambas es que la delaminación inducida por roturas de cortadura es inestable, mientras que las grietas por flexión inducen delaminaciones con un crecimiento estable y proporcional a la carga aplicada.

Crecimiento de la delaminación

Jih y Sun et al.1993, concluyeron que el área de delaminación podría predecirse mediante la máxima fuerza de impacto generada. Wu y Shyu et al.1993, también encontraron que había una relación lineal entre la máxima fuerza y el área de delaminación, y mediante la interpolación de los resultados encontraron un valor umbral de fuerza para el inicio de la delaminación.

Abrate et al.1998, consideró que la delaminación se produce debido a que se supera el umbral de fuerza inicial de delaminación (DTL). La delaminación aumenta linealmente con respecto a la energía de impacto, y esta relación lineal permanece hasta que se alcanza un nivel de energía a partir del cual el área de delaminación deja de crecer, ya que la energía de impacto comienza a ser disipada principalmente a través de la rotura de fibras.

2.4.3 Rotura de fibra

Este modo de daño generalmente ocurre mucho más tarde en el proceso del desarrollo del daño, que la rotura de la matriz y la delaminación. La rotura en las fibras se produce como resultado de la propagación de las fisuras en dirección perpendicular a las fibras. La rotura de las fibras tiene lugar debajo del percutor, debido a los altos esfuerzos localizados que se producen y los efectos de la penetración (principalmente debido a fuerzas cortantes), y sobre la cara posterior no impactada, debido a los altos esfuerzos de flexión inducidos. El fallo de la fibra inicia el fallo catastrófico.

En definitiva, la respuesta de un material compuesto a un impacto, es un proceso dinámico y complejo, que involucra muchos modos de interacción de daños (rotura de la matriz, delaminación y rotura de fibra), Richardson et al.1996. Estos modos de fallos, son dependientes de una manera compleja del enorme número de permutaciones de materiales disponibles (tipos de fibra y resinas, las cantidades, las arquitecturas, las interfaces y el método de producción) Cartié et al.2002.

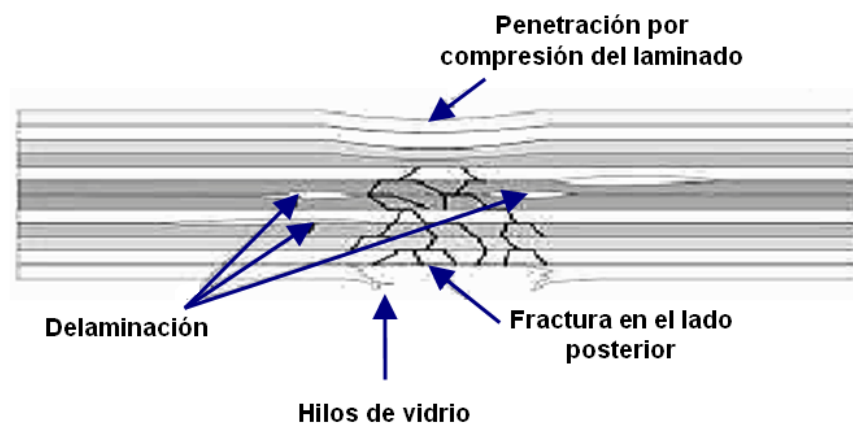


Figura 15. Modos de fallo de un laminado de tejido de vidrio en matriz poliéster.
www.chemia.com

2.5 INFLUENCIA DE LA GEOMETRÍA DE LOS PERCUTORES

En los últimos años se han utilizado ensayos de impacto, para la investigación de la sensibilidad de los sistemas compuestos, es decir, para obtener los efectos que producen los diferentes parámetros del ensayo sobre el crecimiento y la magnitud de los daños.

En estos ensayos de impacto, se produce la penetración y/o perforación de laminados de materiales compuestos mediante percutores, y hay un gran número de parámetros iniciales que a menudo pueden estar involucrados. Estos parámetros incluyen características del material como la fracción de volumen de fibra, estructura de la fibra y la secuencia de apilamiento; las características de las configuraciones estructurales, como las dimensiones de muestra y las condiciones de contorno; y además, las condiciones de impacto, tales como el tamaño del percutor, forma de la punta y la masa del percutor, la velocidad de impacto, el ángulo de impacto y la energía. Todas estas características han sido objeto de revisión por varios investigadores (Abrate et al.1991-1994, Cantwell y Morton et al.1991).

La penetración y perforación de las muestras por proyectiles involucran procesos muy complejos que se han investigado experimentalmente durante más de dos siglos y analíticamente en gran medida durante las últimas décadas. Existe un gran interés en el desarrollo de leyes empíricas o semi-empíricas, que describan los procesos de penetración en las muestras de material compuesto o las condiciones de los impactos para la perforación. Sin embargo, muchos de los modelos analíticos que se han desarrollado, son modelos de un solo mecanismo que pueden utilizarse en aplicaciones limitadas. Las simulaciones numéricas están teniendo un gran resultado en la predicción de la respuesta de las muestras al impacto del proyectil, pero todavía requieren demasiados recursos en términos de tiempo de computación (CPU) (Wen et al.2000).

Para poder desarrollar modelos analíticos eficaces, es necesario conocer cómo influye la geometría de los diferentes percutores que se pueden utilizar, a la hora de simular las condiciones de impacto a las que va a estar sometida la estructura. En los últimos años, se han desarrollado varios tipos de estudios tanto analíticos como experimentales. Entre estos estudios se encuentran los realizados por: Sun (1981), Chaturvedi y Sierakowski (1984), Rutherford (1992), Zhu (1992), Lee y Sun et al.1993, Graves (1992-1994), Mines (1999), Wen (1998-1999-2000), Zhou, Lloyd y Mc.Guirk (2000).

Para simular el escenario de un impacto particular, los parámetros dominantes tienen que ser determinados experimentalmente para que sus efectos en los daños sobre el material compuesto impactado, se tengan en cuenta en el proceso de diseño de los mismos. Esto normalmente requiere varios grupos de ensayos que deben realizarse de tal manera que en un solo grupo se permite que varíe uno de los parámetros, mientras que el resto se mantienen constantes. A menudo, se produce el acoplamiento de los efectos de varios de estos parámetros. Por lo tanto, para producir datos de diseño se tiene que realizar una amplia investigación experimental para la cobertura de diversos tipos de combinaciones.

Existen distintos tipos de estudios que han realizado varios autores para entender cómo la forma y el tamaño de un percutor, influye sobre la magnitud y la propagación del daño por impacto en un sistema compuesto. Estos estudios se pueden clasificar por el tipo de impacto que se utilizó en los mismos, impacto de alta o de baja velocidad, y si son estudios analíticos o experimentales.

2.5.1 Estudios de alta velocidad

En este apartado se van a exponer algunos de los estudios de alta velocidad, tanto experimentales como analíticos, que han desarrollado diferentes autores durante los últimos años, para conseguir comprender y determinar la influencia de la geometría del percutor sobre el comportamiento de los materiales compuestos.

2.5.1.1 Experimentales

Chaturvedi y Sierakowski et al.1984, llevaron a cabo una investigación experimental para estudiar los efectos del tamaño del percutor sobre el crecimiento y la extensión del daño, además de sobre la rigidez y resistencia a la tracción residual, en placas de material compuesto de SMC-R50. Este material está formado por fibras de vidrio orientadas al azar, en resina de

poliéster y carbonato de calcio como material de relleno. Para llevar a cabo esta investigación e infligir los daños por impacto, eligieron percutores cilíndricos de acero con cabezal plano y un diámetro de 9,7mm, con tres longitudes diferentes (25,4, 38,1 y 50,8mm). Los ensayos se realizaron con una pistola de gas para impactar placas de tamaño 15x15mm, utilizando un rango de velocidades de impacto hasta 100 m/s y un rango de energías de impacto de 15 hasta 55J. En este estudio se busca el crecimiento y un nivel de daños en situaciones de impacto localizado. Debido a la semitransparencia del material obtuvieron suficiente información sobre la forma y el tamaño de la zona dañada. Se observó claramente que la extensión del daño disminuyó su tamaño al aumentar el tamaño del percutor, utilizando la misma energía del impacto para los tres percutores. El percutor de menor tamaño tiene la mayor velocidad de impacto de todos los percutores, a un nivel de energía de impacto constante. Con un aumento en la energía cinética del impacto, el tamaño de la zona dañada aumenta de forma no lineal para todos los tamaños del percutor. Sin embargo, para un determinado nivel de energía de impacto, la zona dañada va a depender en gran medida al tamaño del percutor (masa), a medida que aumenta la masa del percutor, disminuye el área dañada.

Zhu et al.1992, investigó experimentalmente la penetración de los laminados de Kevlar29/poliéster mediante proyectiles de punta cónica, y propuso una serie de modelos con diversos mecanismos de energía absorbida, para estimar la resistencia de la muestra al movimiento del proyectil. El ensayo de impacto balístico se dividió en tres etapas consecutivas: penetración, perforación y salida. Las deformaciones estructurales globales se determinaron utilizando la teoría de laminados. Los mecanismos de disipación que incluyen la penetración de la punta de proyectil, abultamiento de la superficie posterior del laminado, rotura de fibras, delaminación y fricción, fueron descritos utilizando ciertas simplificaciones. Se obtuvo una buena concordancia entre las predicciones del modelo y los resultados experimentales.

Graves et al. 1992 y 1994, estudió los mecanismos de deformación durante la perforación balística de laminados gruesos de S-2vidrio/fenólicos, mediante proyectiles planos, y encontró que el fallo puede ser dividido en dos fases. La primera fase incluye la compresión, cizalladura, penetración y la expulsión de restos. En la segunda fase, se produce la formación de un cono de delaminaciones, el estiramiento y fractura de fibras y la salida del proyectil por la cara posterior. Se observó que en la primera fase, el mecanismo de penetración estaba dominado por la resistencia a la compresión a través del espesor del material, que absorbió la mayor parte de la energía del impacto.

Mines et al. 1999, realizó una investigación experimental utilizando impactos de alta velocidad, sobre el comportamiento de laminados de 200x200mm de compuestos poliméricos totalmente empotrados, a velocidades de impacto de hasta 571m/s. Para realizar los ensayos, utilizó tres tipos diferentes de laminados de tejido de fibra de vidrio en matriz poliéster con diferentes espesores (6, 12, 24 capas), tres tipos de percutores (plano, semiesférico y cónico), y dos masas de proyectiles (6 y 12g). Los resultados fueron presentados en términos de energías de perforación estática y de impacto, y mecanismos de absorción de energía durante la perforación en alta velocidad. También se trataron con el fin de mejorar la identificación de combinaciones de materiales. Se llegó a la conclusión de que todos los tipos de materiales analizados se comportan de una manera similar.

2.5.1.2 Analíticos

Sun et al. 1981, dedicó su estudio a establecer una ley contacto para el caso de una bola de acero que incide sobre las placas de material compuesto de SMC-R50, mediante ensayos de penetración. También llevó a cabo algunos experimentos, para medir las historias de tensión dinámica en varios lugares de la placa de SMC impactada por una bola de acero, y poder compararlas con las predicciones generadas por técnicas de elementos finitos.

Wen et al.1998-1999, realizó un amplio estudio sobre la penetración y perforación de laminados FRP y paneles sándwich, para aplicaciones marinas. Presentó los resultados de las pruebas de penetración y perforación, usando percutores con cabezas planas, semiesféricas y cónicas, sometidos a impactos con una torre de caída e impactos balísticos con velocidades de hasta 305m/s. Se presentaron las características de las curvas carga-desplazamiento bajo cargas cuasi-estáticas, y se calcularon las energías correspondientes a las diferentes extensiones de daño. Se compararon las formas de fractura observadas en paneles cargados dinámicamente y bajo condiciones cuasi-estáticas de carga. Se determinaron los límites balísticos y las energías de perforación, y se dedujo una clasificación de las respuestas mediante los datos de los ensayos. La evidencia experimental mostró que el impacto balístico de los percutores sobre laminados FRP y paneles sándwich, se pueden clasificar en respuestas globales (a baja velocidad de impacto) y localizadas.

Desarrolló modelos para realizar simples análisis analíticos y poder predecir la carga de fallo cuasi-estática de la piel superior de los paneles sándwich y la energía absorbida por los mismos. Las fórmulas empíricas que predicen las energías de penetración y perforación de laminados FRP y paneles sándwich, bajo condiciones cuasi-estáticas y de carga dinámica, fueron obtenidas mediante percutores planos y semiesféricos. Se demostró que las predicciones de los modelos, se corresponden con los datos experimentales disponibles. Además, se demostró que en una primera aproximación, la fórmula empírica obtenida para percutores de punta semiesférica también es aplicable para percutores de punta cónica.

Recientemente, Wen et al.2000, realizó un estudio analítico en el que se dan relaciones simples para predecir la penetración y perforación de laminados reforzados con fibra (FRP), impactados con percutores rígidos de diferentes formas, sobre un amplio rango de velocidades de impacto. El enfoque está basado en la hipótesis de que la deformación es localizada y la presión media que ofrece la muestra impactada de laminado para resistir los proyectiles puede descomponerse en dos partes. Una parte es la presión de resistencia cohesiva cuasi-estática debida a la deformación elasto-plástica de los laminados de FRP, aplicada normalmente en la superficie del percutor, y la otra es la presión de resistencia dinámica derivada de los efectos de la velocidad. Las ecuaciones son obtenidas para obtener por predicción la profundidad de penetración (DOP) en las muestras de laminados FRP y los límites balísticos en caso de perforación. Este estudio demostró que las predicciones teóricas están en concordancia con las observaciones experimentales para laminados FRP impactados mediante proyectiles rígidos con punta plana, cónica, semiesférica y ojival, en términos de profundidad de penetración y límites balísticos.

2.5.2 Estudios de baja velocidad

A continuación, se van a exponer algunos de los estudios de baja velocidad, tanto experimentales como analíticos, que han desarrollado diferentes autores durante los últimos años, para conseguir comprender y determinar la influencia de la geometría del percutor sobre el comportamiento de los materiales compuestos.

2.5.2.1 Experimentales

Myers et al.1983, estudió la tolerancia al daño de sistemas compuestos de SMC de fibra corta, mediante estudios experimentales de impacto localizado. Utilizó como técnica de instrumentación una torre de caída de peso, utilizando percutores semiesféricos de diferentes diámetros. Pero ninguno de estos intentos pretendía caracterizar los efectos que tiene el daño por impacto, sobre las propiedades mecánicas residuales de los ejemplares impactados.

Lee y Sun et al.1993, llevaron a cabo un estudio experimental y numérico combinado sobre la penetración dinámica de laminados circulares CFRP mediante proyectiles planos de 30g y 14,5mm de diámetro, en un rango de velocidad de 24-91 m/s. El material compuesto examinado fue el Hércules grafito AS4/3501-6/epoxi con una secuencia de apilado de los laminados de [0/90/45/-45]s. Se realizaron tres tipos de pruebas de impacto sobre los laminados de grafito/epoxy con dos espesores (2 y 4mm), y se determinaron los límites balísticos. El proceso de penetración de los laminados de material compuesto mediante percutores planos, consistía en tres etapas: pre-delaminación, post-delaminación antes y después de perforar. El material fue modelado usando el módulo eficaz y no se incluyeron los detalles de la secuencia de apilamiento en el modelo. Basado en estas tres etapas, se estableció un modelo de elementos finitos para simular el proceso de perforación estática. La curva de carga-desplazamiento simulada fue empleada en el análisis de penetración dinámica, y los desplazamientos en determinados puntos específicos de control fueron adoptados como el criterio de penetración. Se demostró que los resultados de cálculo numérico correspondían con los escasos datos experimentales.

Zhou, Lloyd y Mc.Guirk et al.2000, llevaron a cabo una investigación experimental sobre el comportamiento mecánico de placas de carbono/epoxy y sus modos de fallo. Las placas fueron sometidas a cargas transversales y cuasi-estáticas, mediante una torre de caída universal. Se examinaron los efectos de cuatro factores geométricos, el tamaño del percutor y forma del cabezal, diámetro de la placa y las condiciones de contorno. El tamaño de la punta del percutor varió de 8 a 20mm, mientras que la forma del percutor pasó de un percutor semiesférico a un plano. Se utilizaron placas circulares de 60 y 120mm de diámetro. El objetivo general del trabajo fue examinar los efectos de cada uno de los parámetros bajo distintas condiciones mientras se aísla la contribución de todos los demás, además de estudiar las respuestas estructurales, locales y globales. En general, los efectos de todos los parámetros

estudiados resultaron ser significativos junto con otros, de manera que ninguno de ellos pudo ser descartado. Cada una de las combinaciones de los factores geométricos favoreció distintos tipos de fallos.

El cambio de la forma del cabezal del percutor, tuvo un efecto muy significativo en el comportamiento global de las láminas pequeñas, independientemente de los tamaños de percutores o las condiciones de contorno. En el caso de las placas grandes, no se encontró ningún tipo de efecto significativo, excepto cuando placas grandes empotradas fueron impactadas por los percutores más grandes. El cambio en el tamaño de un percutor semiesférico indujo sólo una respuesta local, independientemente del tamaño de placa o de las condiciones de contorno. Sin embargo, el cambio en el tamaño de un percutor plano generó una respuesta global en todas las placas de distintos tamaños y condiciones de contorno.

2.5.2.2 *Analíticos*

Rutherford et al.1992, modeló la penetración estática por impacto mediante percutores cónicos en muestras gruesas de materiales compuestos reforzados con fibras FRP. El material compuesto se presentaba en forma de laminados de tejidos. Utilizó un enfoque de la energía para relacionar la fuerza a un determinado nivel de penetración, con dos parámetros de resistencia, que representan respectivamente la resistencia del material compuesto longitudinal y transversal.

Debido a la falta de un estándar para los ensayos cuasi-estáticos, parámetros importantes como el tamaño de las muestras, las condiciones de contorno, el tamaño y la forma del cabezal de los percutores, son elegidos arbitrariamente, aunque estos parámetros sean susceptibles de desempeñar un papel determinante en el desarrollo de los mecanismos de daño. Hace mucho tiempo que se ha reconocido que la geometría de los percutores utilizados, la forma y el tamaño, tienen una influencia significativa sobre la magnitud y la propagación del daño por impacto en un sistema compuesto, sin embargo, a pesar de todos los estudios que se han ido realizado a lo largo de los años, todavía existe muy poca información sobre la influencia que ejerce cada uno de estos parámetros sobre los mecanismos de daño. Por lo que existe la necesidad de seguir investigando, ya que sus efectos no son del todo comprendidos.

2.6 EVALUACIÓN NO DESTRUCTIVA

Los daños en los materiales compuestos pueden ser debidos a un impacto, los efectos ambientales o a la aplicación de una carga unidireccional o cíclica, todos los cuales tienen diferentes efectos sobre el material. En los materiales compuestos los daños se ocultan dentro de estructura, especialmente cuando se someten a impacto de baja velocidad (Richardson et al.1996). Esta forma invisible del daño puede causar una grave disminución en la resistencia del material (Niu et al.1992). Una vez se ha generado el daño sobre una placa de material compuesto mediante un ensayo de impacto, el siguiente paso consiste en estimar cuantitativamente ese daño.

La estimación del nivel del daño consiste en la medida del área dañada. Para realizar el estudio de la extensión del daño, es necesario recurrir a herramientas que permitan comprobar el estado de las placas impactadas de material compuesto, de forma externa e interna, localizando las discontinuidades que se presentan en las mismas. Además, deben garantizar que las piezas no sean alteradas, permitiendo la realización de ensayos posteriores para conocer sus propiedades residuales. Esto se consigue utilizando ensayos no destructivos (END). Los ensayos no destructivos juegan un papel muy importante en el análisis de los daños de los materiales compuestos, por el suministro de información útil sobre la iniciación y propagación de los daños.

Existe una variedad de técnicas de inspección no destructiva utilizadas, entre las que se encuentran:

- La inspección visual.
- El análisis digital de imagen.
- Ultrasonidos.
- Radiografía de rayos X.
- Termografía de IR.
- La emisión acústica.

La mayoría de los ensayos no destructivos (END) en los materiales compuestos, se realizan durante o inmediatamente después de la fabricación del componente y consiste en buscar las delaminaciones, rotura de fibras, etc., ya que, la búsqueda de estos daños, es probable que sea más importante cuando la reparación o sustitución es relativamente más fácil que si se realiza durante el servicio (Scott, Scala et al.1982).

De todas estas técnicas, la inspección por ultrasonidos es la más empleada en la detección de la extensión de los daños en los materiales compuestos (Burke et al.1994). La presentación más utilizada es por C-Scan, que permite la evaluación cuantitativa de la superficie dañada.

La inspección visual es la primera evaluación que se realiza para definir la forma y el tamaño del daño provocado por un impacto (Abrate et al.1998). Este tipo de estudio solo es posible realizarlo en materiales compuestos que sean traslúcidos, como lo pueden ser el vidrio/vinilester o el vidrio/poliéster. Una de las herramientas utilizadas en la inspección visual es el análisis digital de imagen, en la que se aprovecha la transparencia de los materiales compuestos a la luz blanca. En las imágenes que se obtienen con esta técnica, aparecen zonas claras que se corresponden a las áreas no impactadas y zonas más oscuras, que se corresponden a las áreas dañadas. Para poder cuantificar la extensión del daño producido en el material, se utilizan programas de tratamiento de imagen (Nunes et al.2004).

Capítulo 3.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.1 INTRODUCCIÓN

Este proyecto trata de determinar la influencia de la geometría de los percutores en los impactos sobre laminados de material compuesto. Para ello, se han realizado ensayos en una torre de caída, en los que se han utilizado distintos tipos de percutores, y se va a analizar cómo evolucionan los resultados en función de la energía de impacto que sea utilizada. Las energías de impacto seleccionadas para realizar los ensayos son 15, 20, 25 y 30 Julios. Los resultados de estos ensayos de impacto determinarán la dependencia de la evolución del daño frente a dos parámetros: la energía de impacto y el tipo de percutor.

En este capítulo se va a exponer toda la información relativa a los ensayos que se llevaron a cabo para la realización de este proyecto. Se comenzará con la descripción de los equipos utilizados en los ensayos de impacto y los materiales que se han empleado para la fabricación de las probetas ensayadas. A continuación, se detalla el procedimiento experimental seguido, y finalmente, el proceso de evaluación no destructiva de las placas.

3.2 MATERIALES

El material que se ha utilizado para el desarrollo de este proyecto, es un laminado de tejido equilibrado de fibra de vidrio “E” en matriz poliéster, constituido por cinco láminas de tejido equilibrado (tafetán). Su fabricación fue realizada por la empresa SISTEMAS Y PROCESOS AVANZADOS en placas de 120mm x 120mm y 3,19mm de espesor.

Las láminas de tejido de fibra de vidrio (RT 800) presentan una densidad de 0,80 kg/m² y fue fabricado por SAINT-GOBAIN VETROTEX. Se trata de un refuerzo altamente compatible con una amplia variedad de resinas, y presentan una buena estabilidad dimensional y unas excelentes propiedades mecánicas.

La matriz utilizada en este laminado fue la resina de tipo poliéster AROPOL FS6902, fabricada por la empresa ASHLAND. Esta resina se caracteriza por presentar una buena flexibilidad, lo que la convierte en una matriz idónea para conseguir laminados que soportan grandes esfuerzos mecánicos. Además, presenta una buena mojabilidad lo que le permite la

unión perfecta con los refuerzos de fibra. Las propiedades mecánicas de la resina utilizada se muestran en la siguiente tabla.

PROPIEDADES MECÁNICAS	
Resistencia a tracción (MPa)	55
Resistencia a flexión (MPa)	105
Deformación a rotura (%)	1,9

Tabla 7. Propiedades de la resina poliéster curada, AROPOL FS6902. Fuente:ASHLAND

Se trata de un material utilizado en amplios sectores de aplicación como la industria del transporte, energías renovables (aerogeneradores), y en la fabricación de recipientes para fluidos como son depósitos y tuberías.



Figura 16. Ferry fabricado en fibra de vidrio/poliéster. www.marmenorferry.com



Figura 17. Tren con el interior fabricado en fibra de vidrio/poliéster. www.metromadrid.es



Figura 18. Aerogenerador con componentes de fibra de vidrio/poliéster. www.opex-energy.com



Figura 19. Depósitos y tubería fabricados en fibra de vidrio/poliéster. www.plastimarmol.com.

3.3 ENSAYOS DE IMPACTO

Actualmente, lo que menos se comprende de los materiales compuestos son los modos de fallo que se inducen cuando son sometidos a diferentes cargas de impacto a baja velocidad, además del modo de iniciación y propagación de los daños.

Los efectos de un parámetro específico sobre los daños que se inducen en un sistema compuesto al ser sometido a un impacto de baja velocidad, tienen que ser determinados experimentalmente. Esto normalmente requiere una amplia investigación experimental con varios grupos de ensayos de impactos, que deben realizarse de tal manera que se permite variar a uno de los parámetros mientras que el resto se mantienen constantes.

En este proyecto, se van a utilizar ensayos de impactos de baja velocidad para entender cómo la forma y el tamaño del percutor, influye sobre la magnitud y la propagación del daño en un sistema compuesto, analizando la respuesta del elemento estructural ensayado.

3.3.1 Equipo

El dispositivo empleado para llevar a cabo los ensayos de impacto es una torre de caída de peso. Se trata de una torre de caída de la marca CEAST Fractovis, modelo 6785. En cuanto a la estructura de la máquina de ensayo, está constituida por dos cámaras, un panel de control y un sistema de adquisición de datos:

- **Cámara superior:** Es la llamada cámara del impactador, donde se encuentra un cabezal móvil que recibe el nombre de impactador o percutor, guiado por columnas para que el desplazamiento sea vertical. El percutor puede lanzarse desde una altura máxima en caída libre de 1m, lo que permitirá alcanzar velocidades de impacto de hasta 4,41 m/s. Esta velocidad puede incrementarse en 20m/s mediante un sistema de energía adicional que incrementa la energía potencial del percutor. Se encuentra

situado en la parte superior de la cámara y consiste en unos muelles que simulan caídas de hasta 10m.

Esta cámara también consta de unos equipos encargados de absorber la energía residual una vez realizado el impacto. Además, cuenta con un equipo antirrobote que detiene el percutor tras el primer impacto sobre la probeta, controlado por un sistema neumático activado por un fotodetector.

El percutor se encuentra instrumentado, y de este modo se pueden obtener el valor de la fuerza que se ejerce sobre la probeta durante el impacto.

- **Cámara inferior:** Es la que proporciona estabilidad al equipo, ya que se trata de una base de gran masa que proporciona rigidez al sistema. En ella se coloca un soporte fijo sobre el que se sitúan todas las probetas. También es conocida como cámara climática, ya que se pueden establecer temperaturas que varíen entre la temperatura ambiente y -150°C .
- **Panel de control:** Permite operar desde el exterior sobre la torre de caída, distinguiéndose en dos partes. Una parte superior que controla todo lo referente a la parte superior de la torre de caída, como la subida y bajada del percutor, el sistema de energía adicional y el sistema antirrobote. Y una parte inferior que controla la cámara climática.
- **Sistema de adquisición de datos:** Su función se centra en recoger y almacenar a alta velocidad los datos que se generan durante el ensayo. Estos datos son enviados al software instalado en un PC, el cual permite que dichos datos sean procesados, puede registrar hasta un máximo de 4000 datos con un tiempo mínimo de $1\mu\text{s}$. Las características de este equipo son importantes para los ensayos realizados, debido a la necesidad de obtener el mayor número de puntos posibles en el tiempo que dura el ensayo.



Figura 20. Torre de caída Ceast 6785 Fractovis.



Figura 21. Cámara superior de la Torre de caída Ceast 6785 Fractovis.

3.3.2 Probetas

El objetivo final de este proyecto es conocer la influencia que tiene la geometría de los percutores sobre el comportamiento frente a impacto de laminados de material compuesto, en particular, sobre laminados de tejido equilibrado de fibra de vidrio E en matriz poliéster, mediante una serie de ensayos de baja velocidad. Para ello, será necesario comparar el comportamiento que presentan una serie de probetas con las mismas dimensiones y características, frente a impactos de distintos tipos de percutores.

Las probetas que se han utilizado para realizar todos los ensayos, se tratan de placas de 120mm x 120mm y con un espesor de 3,19mm.

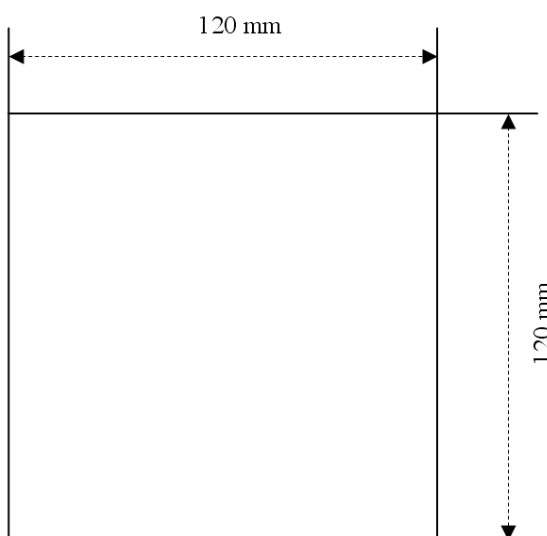


Figura 22. Geometría de probeta utilizada

3.3.3 Utillajes

El utillaje empleado en ensayos de impactos de baja velocidad realizados en una torre de caída consta de dos dispositivos, el percutor y el sistema de amarre de la probeta, cuyas funciones son muy diferentes.

3.3.3.1 Percutores

El percutor es el encargado de aplicar la carga sobre la probeta. La cabeza del percutor alberga en su interior toda la instrumentación necesaria para registrar la fuerza que ejerce el percutor sobre la probeta en cada instante de tiempo. Está formada por una galga extensométrica, a la que se le transmite una deformación elástica durante el impacto. Esta deformación es transformada en una señal eléctrica, la cual es recogida y procesada por el sistema de adquisición de datos.

En la elección de un percutor, hay que tener en cuenta la forma y las dimensiones del cabezal, ya que es la zona que incide directamente sobre las placas ensayadas, al igual que la masa del mismo. Para realizar los ensayos experimentales de este proyecto, se han utilizado ocho percutores de distintas dimensiones y masas. Cuatro de ellos son de cabezal plano, y los otros cuatro son de cabezal semiesférico.

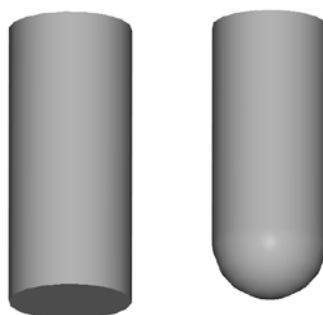


Figura 23. Geometría de los percutores utilizados

A continuación, se muestran las tablas con las diferentes medidas y pesos de los percutores utilizados en los ensayos realizados.

- **Percutores semiesféricos**

NÚMERO	DIÁMETRO (mm.)	MASA (gr.)
1	25,40	122
2	20,40	127
3	16,00	93
4	12,42	63

Tabla 8. Medidas de los percutores semiesféricos utilizados

- **Percutores planos**

NÚMERO	DIÁMETRO (mm.)	MASA (gr.)
5	25,52	198
6	20,00	136
7	16,13	100
8	12,73	81

Tabla 9. Medidas de los percutores planos utilizados

3.3.3.2 Sistema de amarre

La función del sistema de amarre de la probeta, es fijar la probeta estableciendo unas condiciones de confinamiento determinadas. Además, debe cumplir con una serie de requisitos.

- Permitir ensayar probetas cuyas dimensiones sean de 120mm x 120mm, con un espesor de 3,19mm.
- El tamaño de este útil debe permitir su colocación en la cámara de la torre de caída de peso que se va a utilizar.
- Debe garantizar la estabilidad de la probeta, evitando las vibraciones que la misma durante el ensayo.

El útil empleado para el amarre de la probeta, consta de dos placas metálicas entre las que se colocan las probetas y quedan empotradas. Tiene una abertura de forma cuadrada, con una superficie libre para permitir el impacto del percutor sobre la probeta.

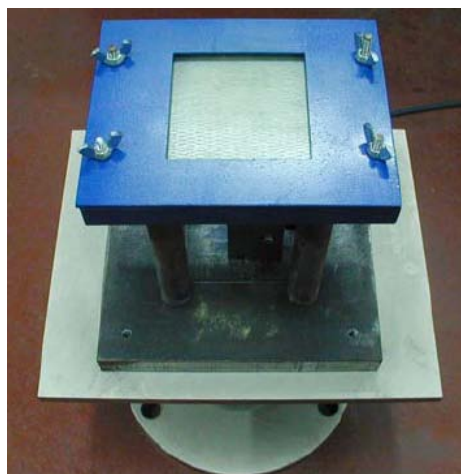


Figura 24. Útil para amarrar las probetas.

3.3.4 Procedimiento experimental

El procedimiento a seguir para la realización de los ensayos de impactos de baja velocidad, se inicia posicionando la probeta en el útil que se utiliza para el amarre de la misma, y que previamente fue colocado en la cámara climática de la torre de caída. Una vez que la probeta está sujeta de forma correcta, se procede a realizar el ensayo de impacto, en el que las probetas van a ser impactadas en la sección central mediante un percutor instrumentado.

Los percutores que se han utilizado en este proyecto, son planos y semiesféricos, de distintos tamaños y pesos. Cada uno de estos percutores, se ha ensayado para cuatro energías de impacto diferentes: 15, 20, 25 y 30 julios. El número de probetas ensayadas para cada tipo de percutor y energía de impacto es de cuatro. El número total de probetas ensayadas han sido de 128. Todos los ensayos de impactos se han llevado a cabo a temperatura ambiente.

3.3.5 Tratamiento de datos

Los ensayos de impacto de baja velocidad, realizados en una torre de caída, dan como resultado el registro de la fuerza que el percutor ejerce sobre la probeta en cada instante de tiempo, durante el tiempo de contacto entre el percutor y la probeta.

La señal que se obtiene de la fuerza, normalmente presenta una serie de oscilaciones que pueden ser debidas a la vibración de la probeta y del percutor durante el impacto.

Un ejemplo de la curva fuerza-tiempo característica de un ensayo de impacto, es el que se muestra en la siguiente figura (figura 25).

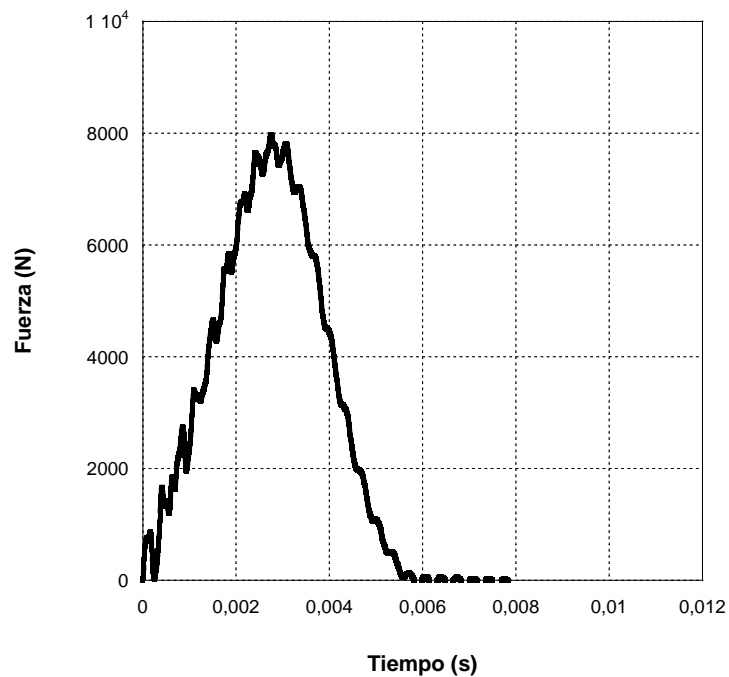


Figura 25. Curva fuerza vs. tiempo registrada en el ensayo de impacto a 20J en la torre de caída, con un percutor semiesférico $\varnothing=20,04\text{mm}$ sobre un tejido de fibra de vidrio en matriz poliéster

En primer lugar, a partir de la señal fuerza-tiempo se va a calcular la aceleración que alcanza el percutor, $a(t)$, mediante el equilibrio dinámico de fuerzas sobre el percutor:

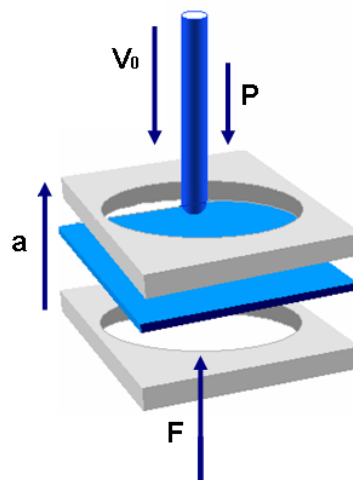


Figura 26. Esquema del equilibrio dinámico de fuerzas sobre el percutor. (Comportamiento de componentes estructurales bajo cargas impulsivas. Departamento de Mecánica de Medios Continuos. Universidad Carlos III)

La ecuación que se obtiene para calcular la aceleración es la siguiente:

$$a(t) = \frac{F(t) - P}{m}$$

Ecuación 3.1. Aceleración que alcanza el percutor

Donde $F(t)$ es la fuerza de contacto, P es el peso del percutor y m es la masa del mismo.
Un ejemplo del resultado obtenido se muestra en la figura 27.

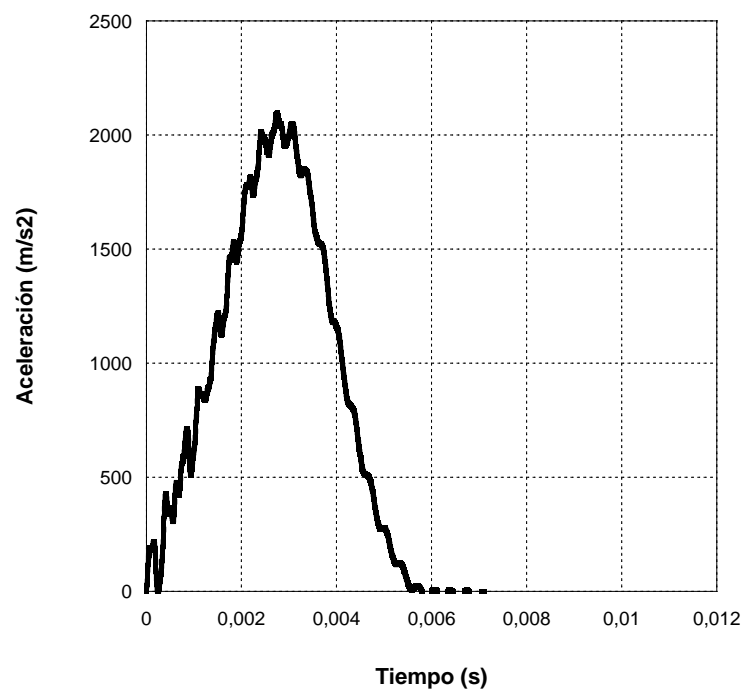


Figura 27. Curva aceleración vs. tiempo registrada en el ensayo de impacto a 20J en la torre de caída, con un percutor semiesférico $\varnothing = 20,04\text{mm}$ sobre un tejido de fibra de vidrio en matriz poliéster

Mediante la integración numérica de la aceleración, se va a obtener la velocidad del percutor durante el impacto, $V(t)$. La ecuación final resultante es la siguiente:

$$V(t) = V_0 - \int_0^t \frac{F(t) - P}{m} dt$$

Ecuación 3.2. Velocidad del percutor durante el impacto

Siendo V_0 la velocidad inicial, correspondiente al instante de tiempo cuando comienza el contacto entre el percutor y la probeta, es decir, cuando el percutor impacta sobre la probeta ($t=0$). Un ejemplo del resultado que se puede obtener se observa en la figura 28.

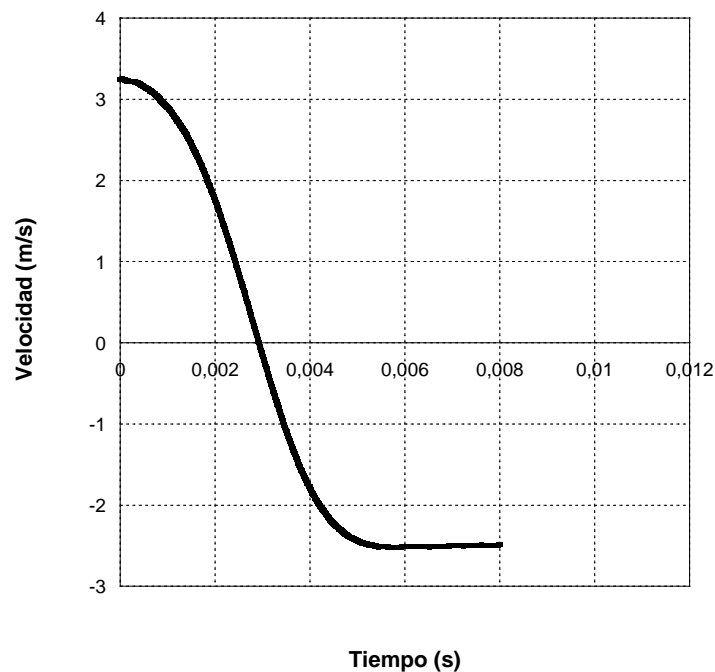


Figura 28. Curva velocidad vs. tiempo registrada en el ensayo de impacto a 20J en la torre de caída, con un percutor semiesférico $\varnothing = 20,04\text{mm}$ sobre un tejido de fibra de vidrio en matriz poliéster

La figura 28, muestra el desarrollo de la velocidad del percutor en función del tiempo, experimentando un descenso a medida que transcurre el impacto hasta llegar a cero. Además, se puede identificar en la gráfica la velocidad inicial del percutor, que en este caso es de 3,25 m/s.

Para la obtención del desplazamiento $X(t)$, que experimenta el extremo del cabezal del percutor durante el impacto, se deberá realizar la integración de la velocidad que se había obtenido antes.

$$X(t) = X_0 + \int_0^t \left[V_0 - \int_0^t \frac{F(t) - P}{m} dt \right] dt$$

Ecuación 3.3. Desplazamiento del extremo del percutor durante el impacto

Donde el desplazamiento inicial X_0 , se considera cero. Un ejemplo del resultado obtenido, se observa en la figura 29.

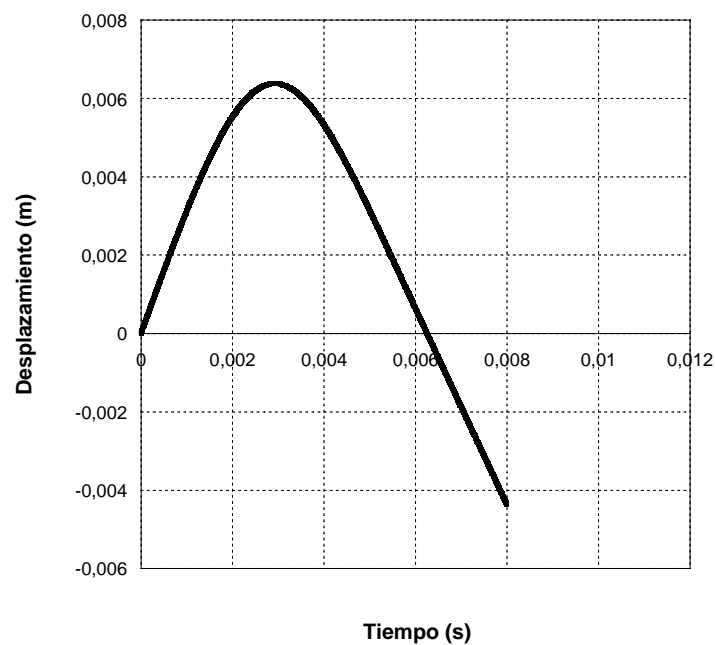


Figura 29. Curva desplazamiento vs. tiempo registrada en el ensayo de impacto a 20J en la torre de caída, con un percutor semiesférico $\varnothing = 20,04\text{mm}$ sobre un tejido de fibra de vidrio en matriz poliéster

En la figura anterior, en la que se ha representado el desplazamiento del percutor en función del tiempo, se puede observar una curva que cuenta con cuatro zonas distintas:

1. La primera zona de la curva se corresponde con el incremento del desplazamiento del percutor.
2. La segunda zona aparece al alcanzar el máximo desplazamiento que sufre el percutor.
3. En la tercera zona se produce la recuperación del percutor.
4. La última zona de la curva, muestra desplazamientos negativos que corresponden al rebote sufrido por el percutor.

Se va a asumir que en el transcurso de los distintos ensayos, el contacto entre la probeta y el percutor es permanente, que no existe deformación del percutor y que el espesor de la probeta no varía, por lo tanto, se puede suponer que el desplazamiento que sufre el extremo del percutor será igual que el desplazamiento vertical que sufre la cara superior de la probeta.

Una vez obtenidos los valores del desplazamiento, se procederá a construir la curva fuerza-desplazamiento, como se muestra en la siguiente figura:

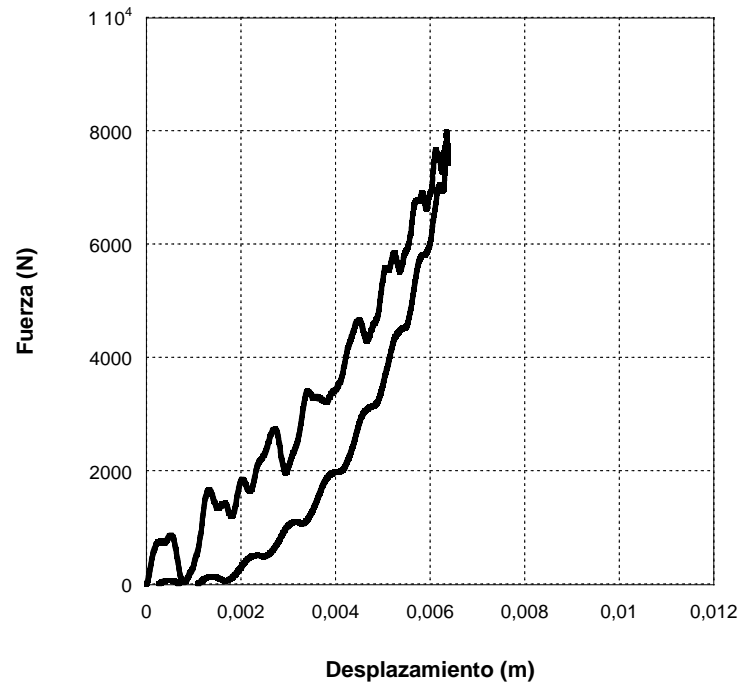


Figura 30. Curva fuerza vs. desplazamiento registrada en el ensayo de impacto a 20J en la torre de caída, con un percutor semiesférico $\varnothing=20,04\text{mm}$ sobre un tejido de fibra de vidrio en matriz poliéster

A partir de la curva fuerza-desplazamiento, se puede calcular la propiedad más significativa de un ensayo de flexión biaxial, los cuales están caracterizados por su correspondiente energía absorbida hasta la rotura, siendo este parámetro, fundamental para resistir a los impactos de baja velocidad, ya que representa la capacidad de las fibras de almacenar la energía elásticamente (Cantwell et al.1991).

La energía absorbida hasta la rotura del material en estudio, se calcula mediante la integración numérica de la curva fuerza-desplazamiento. Esta energía se puede calcular para cada instante de tiempo, mediante la ecuación que se muestra a continuación.

$$E(t) = \int_0^t F(t) \left[V_0 - \int_0^t \frac{F(t) - P}{m} dt \right] dt$$

Ecuación 3.4. Energía absorbida por la probeta

En la siguiente curva se representan los valores de la energía absorbida en un impacto.

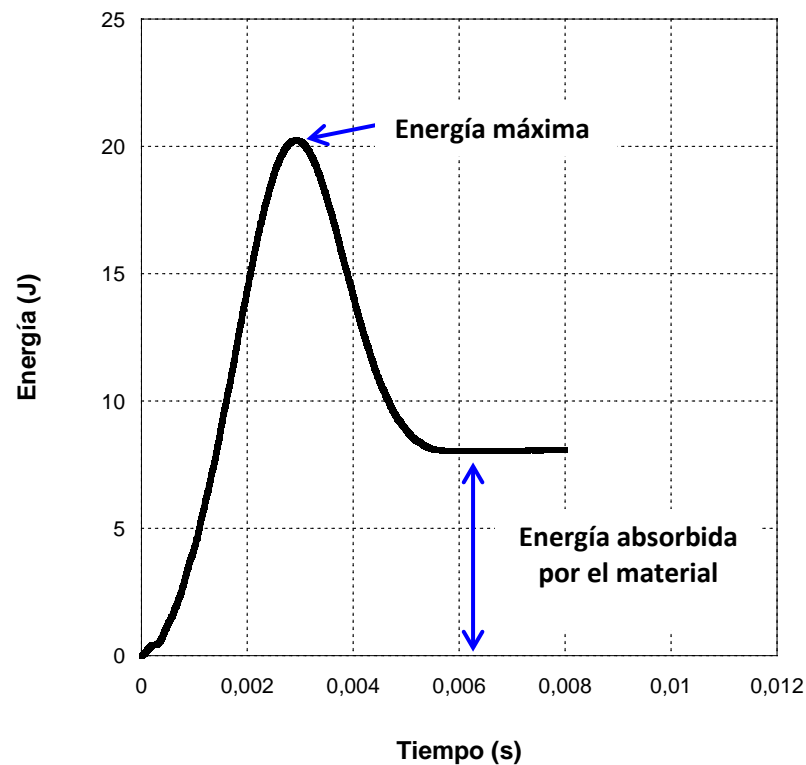


Figura 31. Curva energía vs. tiempo registrada en el ensayo de impacto a 20J en la torre de caída, con un percutor semiesférico $\varnothing=20,04\text{mm}$ sobre un tejido de fibra de vidrio en matriz poliéster

La figura 31, es la curva típica de un ensayo de impacto de baja velocidad, en el que no se produce la perforación de la probeta. Podemos observar, cómo el valor de la energía aumenta hasta alcanzar un máximo cercano a la energía de impacto, no llegando a ese valor ya que siempre se producen pérdidas de energía por rozamientos. A partir de este valor máximo, en el caso de que se produjera la rotura de la probeta, la curva seguiría una línea horizontal que representa que toda la energía ha sido absorbida en el proceso de deformación y rotura. Si la probeta no rompe, como ocurre en este caso, la curva de la energía disminuye hasta estabilizarse en el valor de la energía absorbida por el material, mediante los mecanismos de daño durante el impacto. En el caso de no producirse ningún daño en la probeta, la curva de la energía absorbida llegaría a alcanzar el valor cero.

3.4 EVALUACIÓN NO DESTRUCTIVA

La evaluación del daño se puede realizar por diferentes métodos como la inspección visual, ultrasonidos, emisión acústica, etc., como se expone en el apartado 2.6. En este proyecto, la evaluación no destructiva de las muestras ensayadas se realizó mediante la inspección visual y el tratamiento digital de imágenes.

Se ha podido utilizar la técnica de la inspección visual, debido a la propiedad de semitransparencia que posee el material empleado, y se ha obtenido información suficiente sobre la forma y el tamaño de la zona dañada.

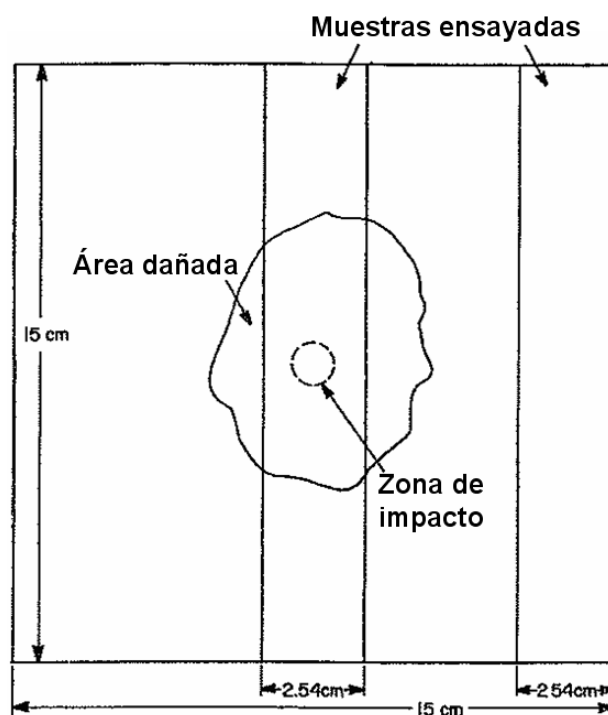


Figura 32. Esquema tipo de una placa dañada y sin dañar. *Effects of impactor size on impact damage-growth and residual properties in an SMC-R50 composite. S.K. Chaturvedi and R.L. Sierakowski et. al.1984)*

El equipo que se utilizó para poder llevar a cabo el tratamiento digital de las imágenes, fue una cámara fotográfica digital para realizar las fotografías de todas las probetas impactadas.

3.4.1 Procedimiento experimental

Para realizar las fotografías de las muestras ensayadas, se colocaron sobre un soporte cuadrulado para poder tener una mejor ubicación de las mismas, y por encima de éstas, se situó una fuente luminosa para conseguir una imagen fotográfica adecuada y de alta calidad de cada una de las muestras impactadas.

En las fotografías realizadas de las muestras impactadas en las que se ha producido algún daño, se pueden apreciar fácilmente las zonas dañadas de las probetas ya que resaltan del resto del material. Las zonas dañadas presentan un color más blanco, aumentando esta blancura a medida que aumenta la intensidad del daño producido mediante el impacto. Un ejemplo lo podemos ver en la siguiente fotografía (figura 33).

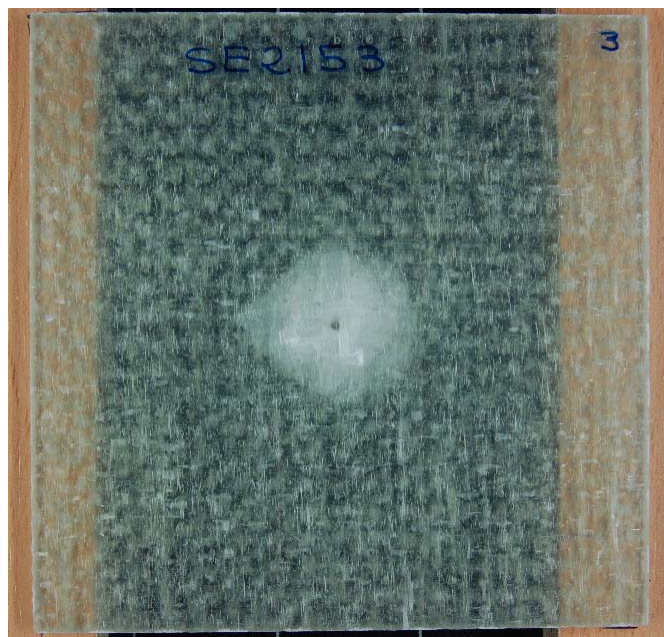


Figura 33. Fotografía digital de una muestra impactada con el percutor semiesférico SE2 $\varnothing=20,04\text{mm}$ con una energía de impacto de 15J

Una vez realizadas todas las fotografías digitales de las muestras impactadas con los diferentes tipos de percutores, a cada una de las diferentes energías de impacto estudiadas, se ha llevado a cabo el cálculo del porcentaje de área dañada utilizando el programa de tratamiento de imagen, Image-J.

El programa Image-J se trata de una herramienta de análisis y procesamiento de imágenes digitales, el cuál calcula con gran facilidad los valores de los píxeles de las imágenes, así como las áreas específicas mediante una previa detección de contornos.

Para calcular el área dañada que se ha producido en las probetas impactadas mediante este programa, se procederá cómo se describe a continuación.

1. Abrir la imagen digital. Para ello se abre menú: “File/Open”. Se busca la carpeta en la que se encuentra la imagen, se selecciona el archivo de la imagen y se hace clic en el botón “Abrir”.
2. Medir el valor de una distancia conocida de la fotografía digital que queramos analizar, que en este caso será el ancho de la placa de 120mm. El programa medirá esa distancia en píxeles.

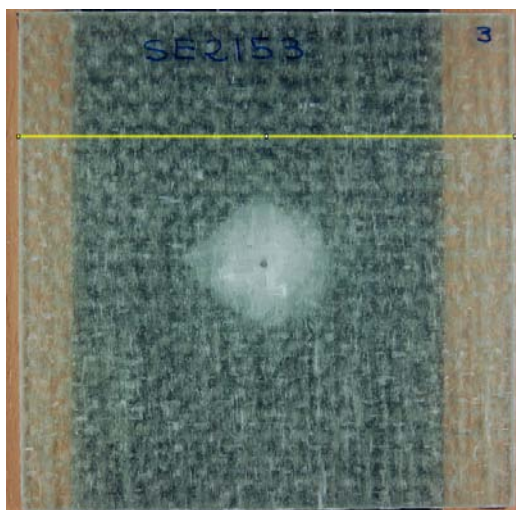


Figura 34. Medida del ancho de una muestra impactada. Image-J

3. Cambiar la escala del programa, introduciendo el valor del ancho de la placa 120mm y seleccionando la unidad de medida correspondiente (mm.).

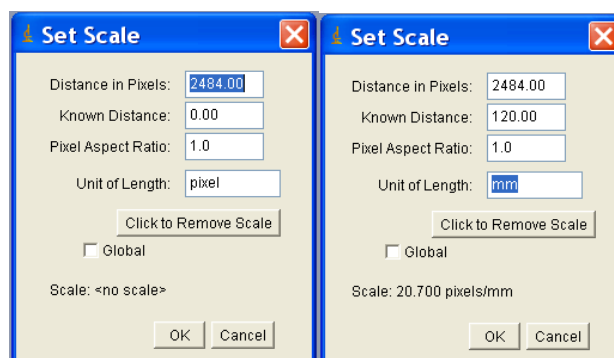


Figura 35. Cambio de la escala de medida. Image-J

4. Seleccionar la opción “Freehand selections”. El cursor se convertirá en una cruz. Hacer clic en el borde del área dañada de la probeta que se desee analizar, y sin soltar el botón del ratón marcamos el contorno del área. Este contorno se marcará en amarillo.

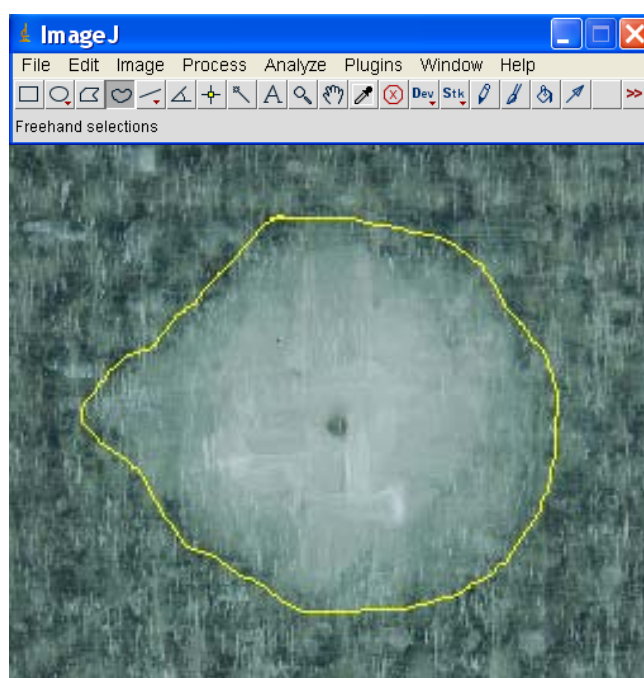


Figura 36. Selección del contorno dañado. Image-J

5. Para elegir los resultados que se quieren obtener mediante el análisis de la imagen, hay que seleccionar el menú: “Analyze/Set Measurements”. Aparecerá

una ventana en la que se pueden seleccionar todas aquellas medidas que se deseen obtener sobre la placa, en este caso el valor del área dañada.

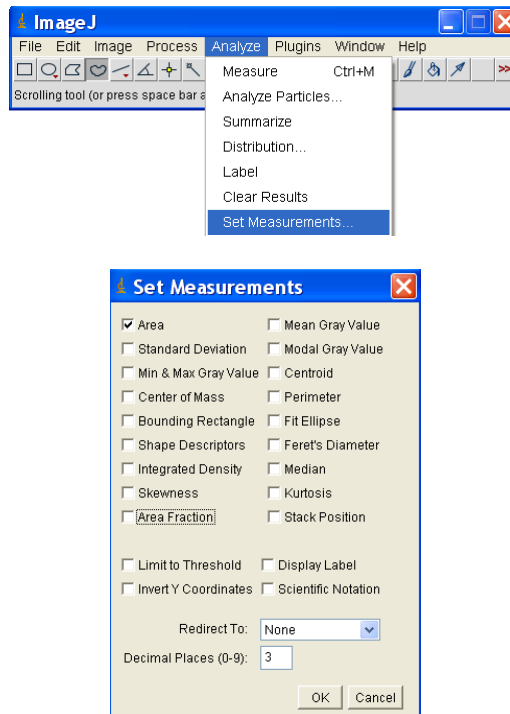


Figura 37. Elección de resultados. Image-J

6. Elegir el menú “Analyze/ Measure”, y aparecerá una nueva ventana “Results” con todos los resultados esperados.

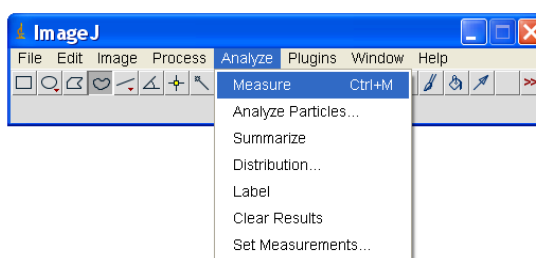


Figura 38. Obtención de la medida del área dañada. Image-J

A partir de las medidas de área dañada obtenidas mediante el análisis de todas las probetas impactadas, se calculará el valor medio del porcentaje de área dañada para cada tipo de ensayo realizado, en función del percutor y la energía de impacto utilizada.

Capítulo 4.

RESULTADOS EXPERIMENTALES

4.1 INTRODUCCIÓN

A lo largo de este capítulo, se presentarán los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos realizados sobre las probetas. Se han realizado cuatro ensayos para cada tipo de energía de impacto y percutor, y se ha determinado para cada placa impactada el desplazamiento máximo, energía absorbida y porcentaje de área dañada.

Finalmente, se exponen los resultados del estudio de evaluación del daño. En el que se ha definido la forma y tipo de daño producido en las probetas mediante la inspección visual de las placas ensayadas, y se ha estimado el área dañada en cada probeta de forma tanto cualitativa, como de forma cuantitativa mediante fotografías digitales a través del programa de tratamiento de imágenes, Imagen-J.

4.2 RESULTADOS DEL TRATAMIENTO DE DATOS

En el desarrollo de este proyecto, se han realizado ensayos con ocho tipos de percutores y se han analizado los datos en función de la energía de impacto utilizada (15, 20, 25 y 30 Julios).

Para calcular la energía absorbida por las probetas para cada tipo de impacto, se han realizado integraciones sucesivas, a partir del registro de la fuerza que ejerce el percutor sobre la probeta en cada instante de tiempo. Para ello, se ha utilizado el programa KaleidaGraph, una herramienta de análisis de gráficos y datos.

4.2.1 Fuerza

La historia de la fuerza en un ensayo de impacto, puede proporcionar información importante relativa a la iniciación de daños y su crecimiento. Muchos investigadores han documentado que la iniciación del daño se manifiesta en la gráfica carga-tiempo como una caída

repentina de la carga, debida a la pérdida de rigidez de un desarrollo de daño inestable (Lee SM y Zahuta et al.1991, Kwon y Sankar et al.1993 y Zhang X. et al.1998).

Se considera que el daño en una placa ensayada es significativo cuando lo que predomina son las delaminaciones. Se cree que las roturas de matriz son el primer modo de fallo introducido durante el impacto, pero es posible que los ensayos de impacto no sean lo suficientemente sensibles, para detectar cambios de carga debido a microfracturas localizadas de la matriz (Sjöblom et al.1988). Este hecho muestra que la presencia de roturas en la matriz, no tiene un efecto dramático sobre la rigidez de todo el laminado, pero sí que los puntos de rotura de la matriz actúan como puntos de iniciación de las delaminaciones y rotura de fibras, y éstas si pueden cambiar la rigidez local o global del compuesto, y el efecto en la respuesta de la curva carga-tiempo (Herup et al.1997).

Hirai et al.1998, declaró que la carga de daño inicial en sus ensayos sobre laminados de vidrio, era una consecuencia de un fallo de la interfase o rotura de la matriz cerca de la superficie posterior de los laminados. Y concluyó, que la primera caída de la carga que se muestra en la curva de la fuerza, corresponde al inicio del daño.

L.S. Sutherland y C. Guedes Soares et al.2004, dedujeron de sus ensayos que había diferencias en las respuestas de las placas de compuestos vidrio/poliéster, dependiendo del grosor de los laminados. En el caso de los laminados finos ($\sim 3\text{mm}$), a diferencia de los laminados de mediano y gran espesor, en las gráficas de carga-tiempo no se muestra una respuesta bilineal, que delimite los comportamientos de la placa sin daños y cuando se producen delaminaciones internas. Pero en ambos tipos de laminados, tanto finos como de gran espesor, las delaminaciones se producen para un valor umbral bajo de energía. El daño en las placas finas ($\sim 3\text{mm}$) impactadas, debido a las delaminaciones internas no se refleja en estas gráficas, aunque no ocurre lo mismo con el daño producido en las fibras, el cual se produce para mayores energías de impacto y se puede observar en las gráficas porque sigue un patrón de diente de sierra.

A continuación, se van a exponer las gráficas que se han obtenido en los ensayos realizados, de la evolución de la fuerza ejercida sobre las probetas por cada tipo de percutor y energía de impacto utilizada.

Percutores semiesféricos

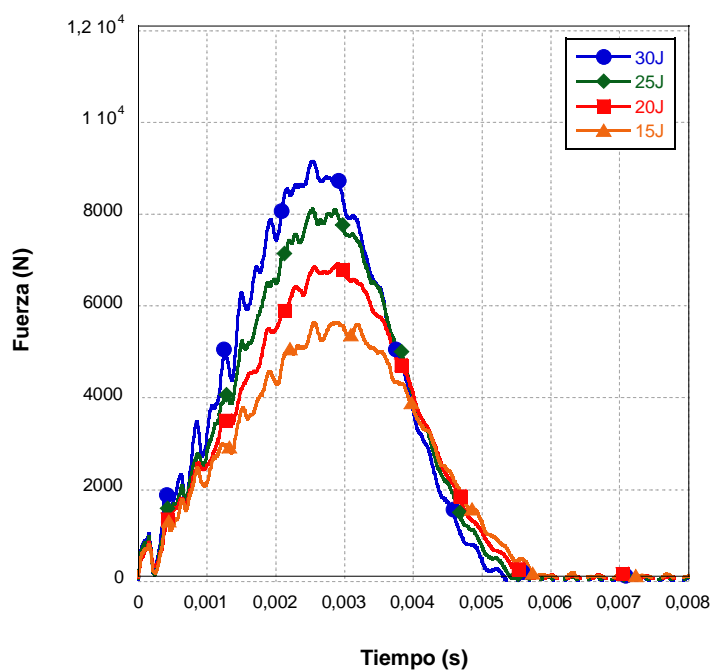


Figura 39. Comparación de los registros experimentales de fuerza utilizando el percutor semiesférico 1 $\varnothing=25,14\text{mm}$, para todos los niveles de energía de impacto

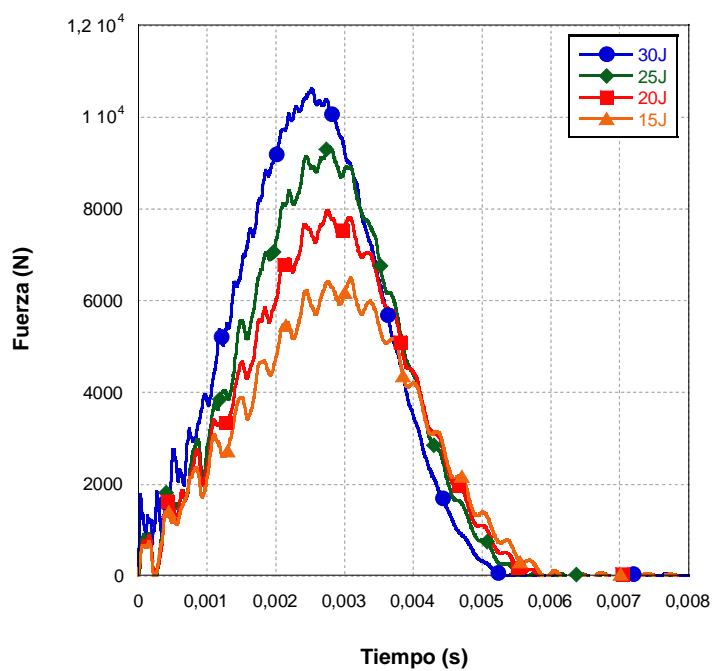


Figura 40. Comparación de los registros experimentales de fuerza utilizando el percutor semiesférico 2 $\varnothing=20,4\text{mm}$, para todos los niveles de energía de impacto

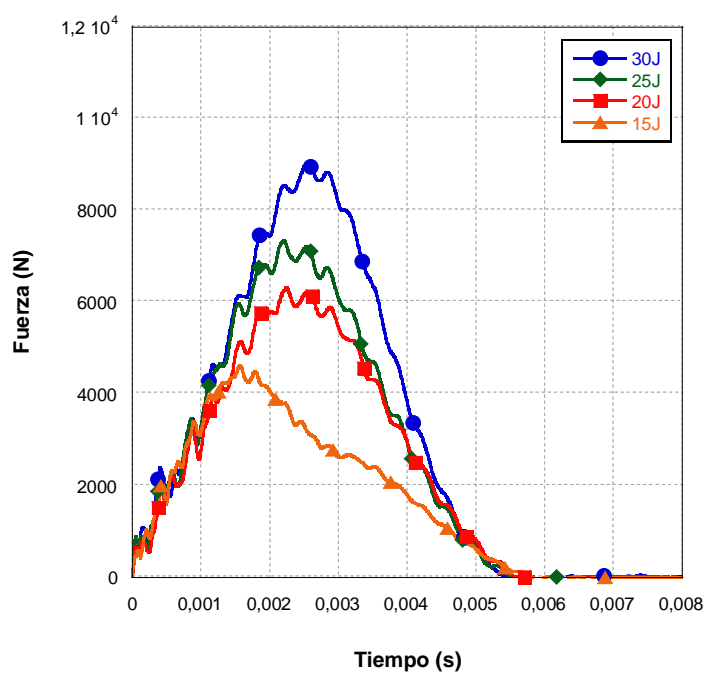


Figura 41. Comparación de los registros experimentales de fuerza utilizando el percutor semiesférico 3 $\varnothing=16\text{mm}$, para todos los niveles de energía de impacto

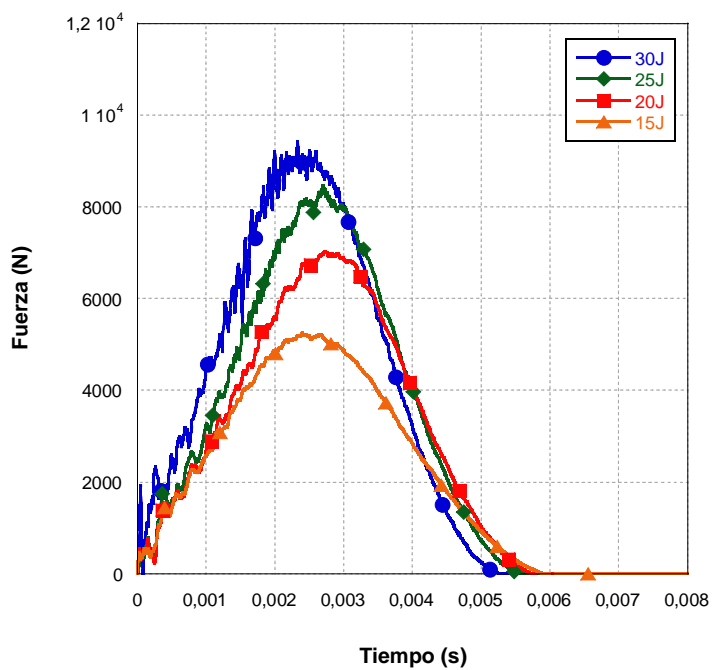


Figura 42. Comparación de los registros experimentales de fuerza utilizando el percutor semiesférico 4 $\varnothing=12.42\text{mm}$, para todos los niveles de energía de impacto

Percutores planos

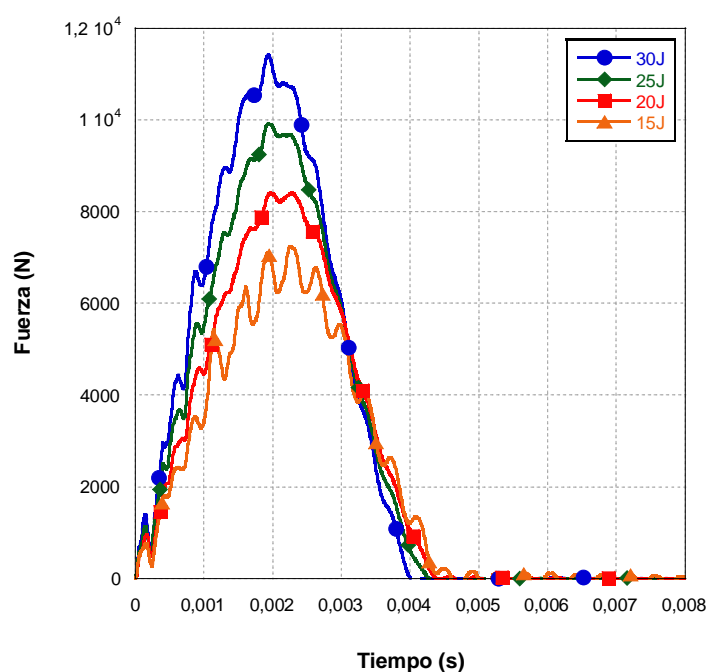


Figura 43. Comparación de los registros experimentales de fuerza utilizando el percutor plano 5 $\varnothing=25,52\text{mm}$, para todos los niveles de energía de impacto

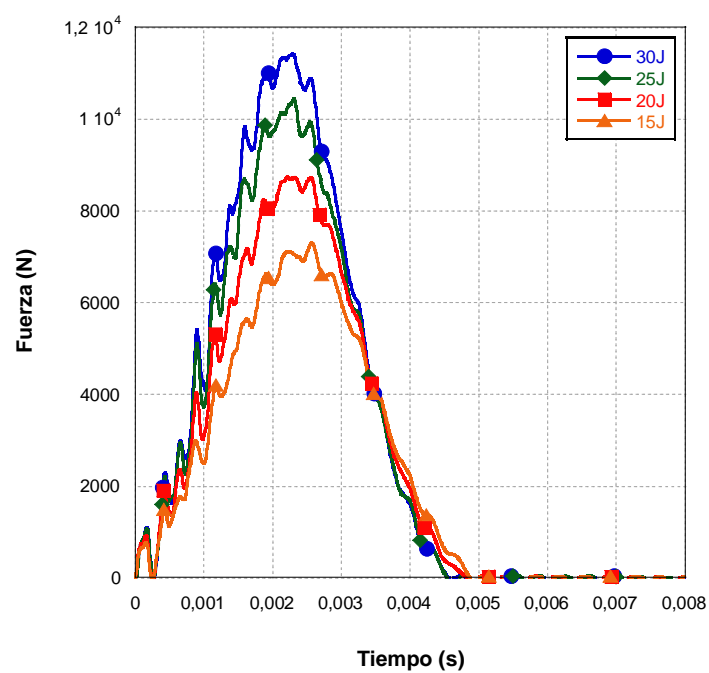


Figura 44. Comparación de los registros experimentales de fuerza utilizando el percutor plano 6 $\varnothing=20\text{mm}$, para todos los niveles de energía de impacto

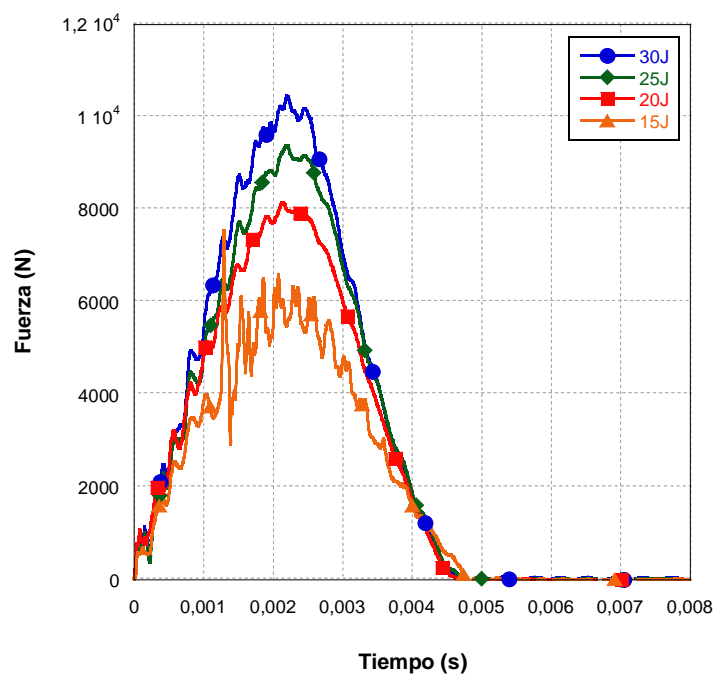


Figura 45. Comparación de los registros experimentales de fuerza utilizando el percutor plano 7 $\varnothing=16,13\text{mm}$, para todos los niveles de energía de impacto

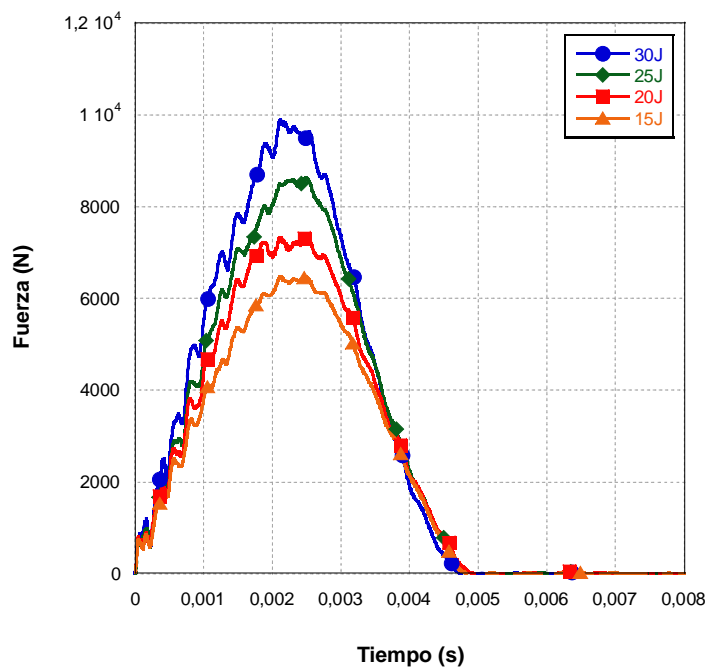


Figura 46. Comparación de los registros experimentales de fuerza utilizando el percutor plano 8 $\varnothing=12,73\text{mm}$, para todos los niveles de energía de impacto

En la mayoría de las curvas experimentales que se han obtenido en los ensayos realizados, durante la parte de carga aparecen algunas pequeñas oscilaciones, que se denominan ruido. Este ruido que aparece en las diferentes curvas, puede ser debido a varias causas posibles: las vibraciones debidas a la propia flexibilidad de la torre de caída, a las respuestas elásticas y vibraciones de las placas impactadas, o al percutor, que esté formado por varios elementos y no con una única pieza.

Observando las gráficas de cada uno de los percutores, podemos decir que en todos los casos existen oscilaciones en las gráficas de la fuerza, que indican que se han producido pérdidas de energía durante el impacto. Es decir, se han inducido daños en todas las placas en durante los ensayos realizados. Los daños se inician mediante la deformación y rotura de la matriz, seguido de las delaminaciones, siendo la rotura de fibra el último modo de fallo. Vamos a tener en cuenta, que el daño debido al crecimiento de las delaminaciones internas de la placa no se distingue en estas gráficas, aunque si el daño producido en las fibras, que se pueden observar en las gráficas porque siguen un patrón de diente de sierra. Es importante tener en cuenta que en las gráficas de la evolución de la fuerza, solo se puede observar la carga en la que se produce el inicio de un daño importante y no la cantidad final de daño acumulativo que se produce debido al impacto.

En las gráficas de los percutores semiesféricos, podemos decir que en la del percutor de mayor diámetro SE1, se observa que se han comenzado a producir rotura de fibras con las energías de impacto de 25 y 30 julios, al igual que con el percutor SE2, ya que aparecen en las gráficas formas de diente de sierra, aunque no demasiado pronunciadas. Para el caso del percutor semiesférico SE3, no se observa formas de dientes de sierra con ninguna de las energías de impacto, solo muestran oscilaciones suaves en las señales. Solo para el caso del percutor semiesférico SE4 con el menor diámetro de todos (12,42mm), se observan formas de diente de sierra en todas las energías de impacto utilizadas, siendo mucho más pronunciadas para los casos de 25 y 30 julios.

En las gráficas del percutor plano de mayor diámetro PL5, podemos observar que solo aparecen oscilaciones continuas de la señal, sin formas de diente de sierra por lo que no se producen roturas de fibra. En el caso del percutor PL6, solo se observa posibles roturas de fibras para la mayor energía de impacto, 30J. En las gráficas del percutor plano PL7, las roturas de fibra se pueden ver para las energías de impacto de 25 y 30 J, además de una disminución repentina en la carga, para el caso de la energía de impacto de 15J, seguida de oscilaciones de

gran amplitud de la carga, que se atribuye a la inestable propagación de la delaminación (G.A. Schoeppner, S.Abrate et al.2000). Por último, para el percutor plano PL8, se observan posibles roturas de fibras en todos los niveles de energía excepto la menor energía de impacto, 15J.

Adicionalmente, se observa la misma tendencia para todos los tipos de percutores a medida que se aumenta la energía de impacto se produce el aumento de la fuerza, y una disminución del tiempo de impacto. Aunque la disminución del tiempo de impacto, no se observa con tanta claridad en el caso de los percutores planos.

4.2.1.1 Fuerza máxima

A través del registro de la fuerza de los distintos ensayos realizados, se ha obtenido el valor de la fuerza máxima alcanzada por cada uno de los percutores utilizados. En las siguientes gráficas, se presenta la relación existente entre la fuerza máxima que ejercen los percutores sobre las probetas y las diferentes energías de impacto ensayadas.

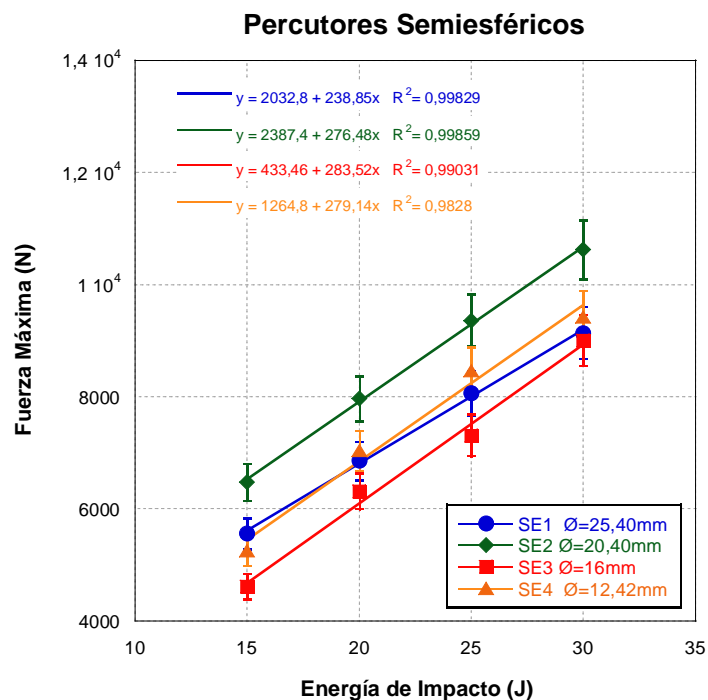


Figura 47. Representación de la fuerza máxima vs.la energía de impacto, en ensayos en la torre de caída utilizando los percutores semiesféricos

En la figura 47, se representa la fuerza máxima ejercida por los percutores semiesféricos en función de la energía de impacto utilizada en los ensayos. En todos los casos existe una relación lineal entre la fuerza máxima y la energía de impacto, y la correlación es directa, las dos variables aumentan a la vez. Todos los coeficientes de regresión son mayores a 0,98, lo que indica que el ajuste es bueno, y que en todos los casos los modelos son fiables para hacer predicciones. Además, vemos cómo la pendiente con la que crece la fuerza máxima, es prácticamente la misma para todos los percutores.

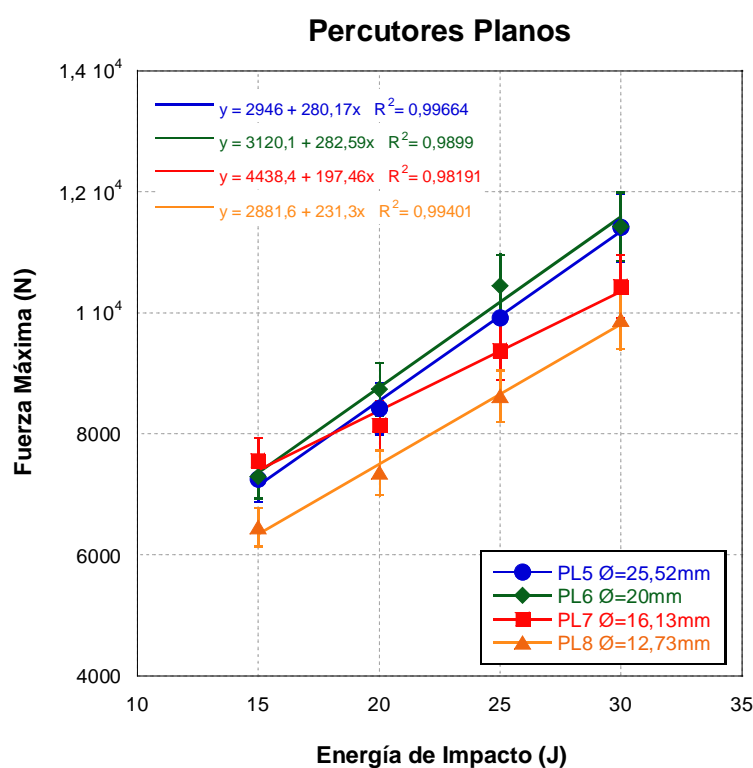


Figura 48. Representación de la fuerza máxima vs. la energía de impacto, en ensayos en la torre de caída utilizando los percutores planos

En la figura 48, se representan las fuerzas máximas alcanzadas por los percutores planos durante los ensayos. En este caso, también existen para todos tipos de percutores, relaciones lineales con coeficientes de regresión mayores a 0,98, por lo que las relaciones elegidas son buenas aproximaciones. Observando la gráfica, vemos que la pendiente con la que aumenta la fuerza en función de la energía de impacto, es menor para el caso del percutor plano PL7, que para el resto de percutores planos.

Comparando las dos gráficas, se puede ver cómo con los percutores planos se alcanzan mayores fuerzas máximas, que con los percutores semiesféricos, para un mismo valor de energía de impacto aplicada, disminuyendo esta diferencia a medida que se utilizan mayores energías de impacto. Además, para ambos casos el mayor valor de fuerza no lo alcanzan los percutores de mayor diámetro si no los percutores SE2 y PL6 con 20mm de diámetro.

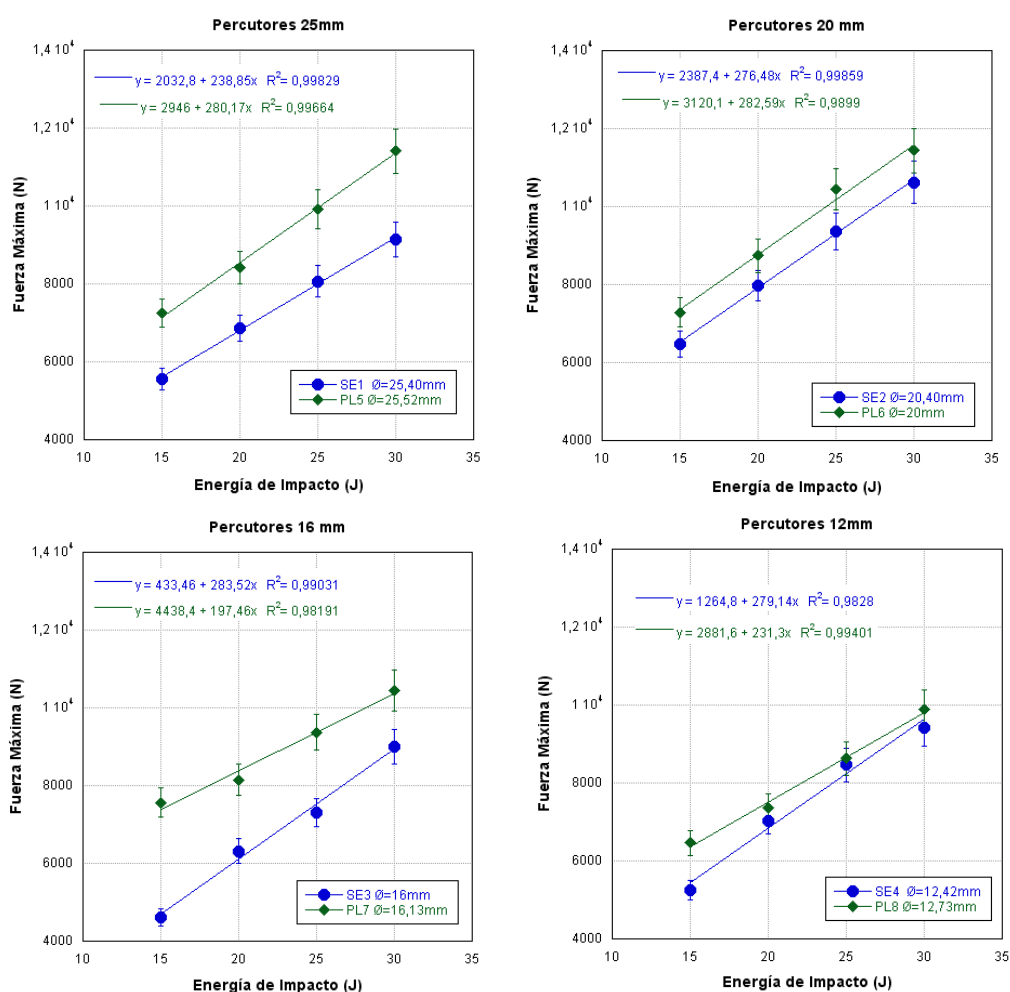


Figura 49. Comparación de fuerza máxima vs. la energía de impacto de percutores con el mismo diámetro.

Comparando percutores con distinta geometría pero el mismo tamaño del diámetro, podemos observar que la diferencia del valor de la fuerza máxima alcanzada por los percutores planos con respecto a los semiesféricos disminuye al disminuir el diámetro del percutor.

4.2.2 Desplazamiento

Como se ha descrito en el apartado anterior, la medida de los desplazamientos en los ensayos en la torre de caída, se ha realizado de forma indirecta a partir de los registros fuerza-tiempo, mediante el programa KaleidaGraph. El desplazamiento del percutor incluye tanto la deformación de la placa como el abollamiento local en la zona impactada.

A continuación, se van a exponer dos ejemplos de las gráficas que se han obtenido de los ensayos realizados, que muestran la evolución del desplazamiento vertical del punto de impacto producido por cada tipo de percutor y energía de impacto utilizada.

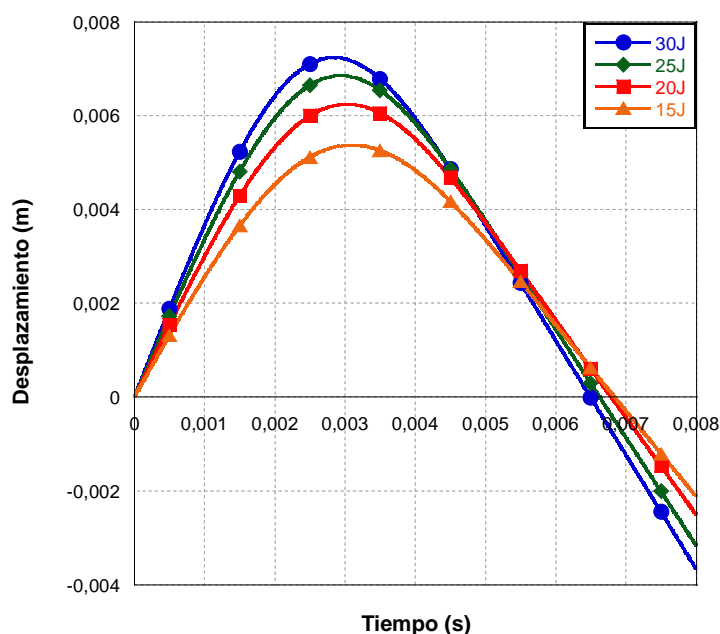


Figura 50. Comparación de los registros experimentales de desplazamiento utilizando el percutor semiesférico 1, para todos los niveles de energía de impacto ensayados

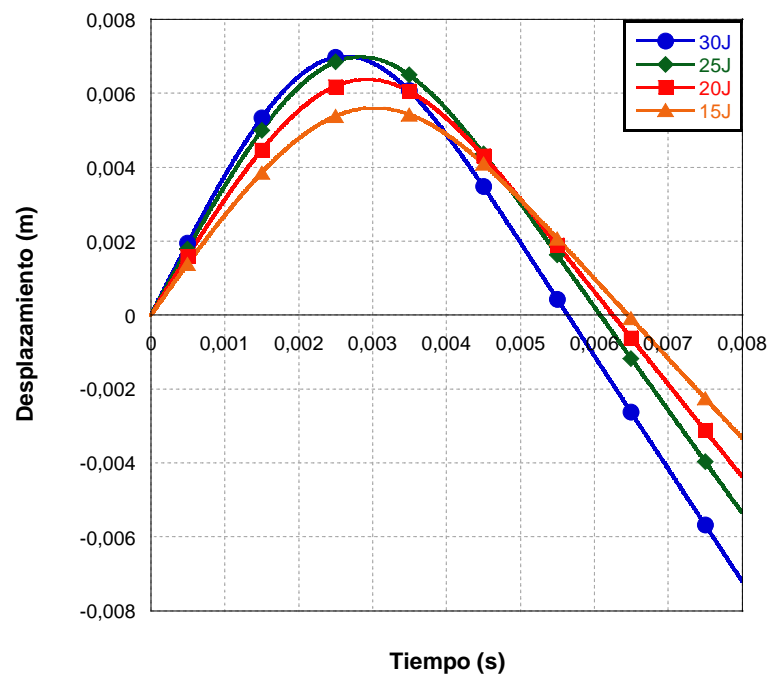


Figura 51. Comparación de los registros experimentales de desplazamiento utilizando el percutor semiesférico 2, para todos los niveles de energía de impacto ensayados

En todas las gráficas se puede observar, independientemente del tipo de percutor utilizado, que el desplazamiento vertical del percutor aumenta con la energía de impacto.

Al igual que ocurría en las gráficas de la fuerza, también se distingue claramente la disminución del tiempo de ensayo al aumentar la energía de impacto para todos los percutores utilizados, siendo esta disminución menor en el caso de los percutores planos.

4.2.2.1 Desplazamiento máximo

Las siguientes gráficas muestran la relación existente entre el desplazamiento vertical máximo obtenido en el punto de impacto de las placas ensayadas y las diferentes energías de impacto utilizadas.

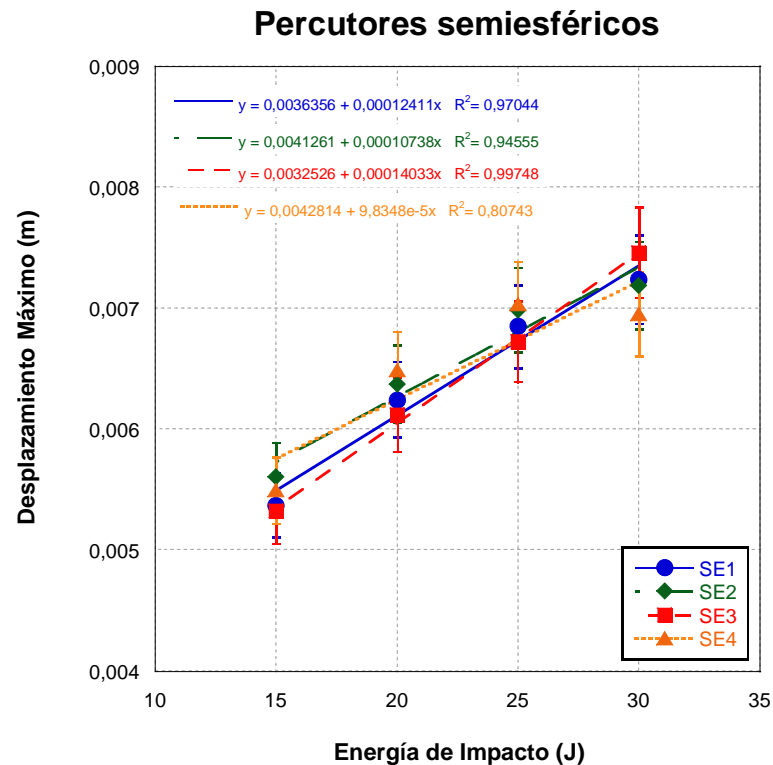


Figura 52. Representación del desplazamiento máximo vs. la energía de impacto, en ensayos en la torre de caída utilizando los percutores semiesféricos

La figura 52, muestra una relación lineal entre las variables para todos los percutores semiesféricos, siendo todas ellas correlaciones directas, es decir, el desplazamiento máximo aumenta al aumentar la energía de impacto. Para todos los casos, excepto para el percutor de menor tamaño SE4, el valor del coeficiente de regresión es mayor de 0,94, por lo que las relaciones obtenidas son aceptables para hacer predicciones, siendo el modelo del percutor SE3 el más fiable con un valor del coeficiente de regresión, mayor de 0,99. En el caso del percutor SE4, es el que peor se ajusta a la recta, aunque con un coeficiente de regresión mayor de 0,80, su modelo es aceptable.

Cómo se puede observar, el desplazamiento máximo alcanzado por cada uno de los percutores en las distintas energías de impacto, es prácticamente el mismo para todos los casos, variando un máximo de un 5% con una energía de de impacto de 15J, y un 7% con una energía de 30J.

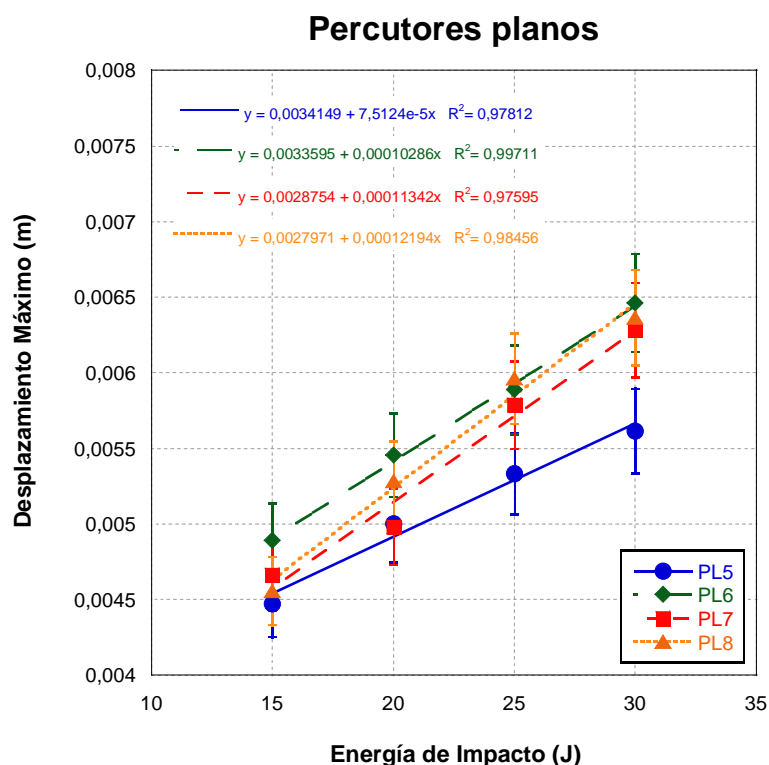


Figura 53. Representación del desplazamiento máximo vs. la energía de impacto, en ensayos en la torre de caída utilizando los percutores planos

La figura 53, muestra la relación lineal del desplazamiento máximo alcanzado en función de la energía de impacto, para el caso de los percutores planos. Como se puede observar, todos los percutores muestran una relación lineal entre las variables con un coeficiente de regresión mayor a 0,97, por lo que las curvas representadas son una buena aproximación. A diferencia de las curvas de los percutores semiesféricos, existe una mayor variabilidad en los valores del desplazamiento máximo alcanzado con los distintos percutores. Todos los percutores siguen la misma tendencia, excepto el percutor de mayor tamaño PL5, que obtiene un menor desplazamiento máximo para todas las energías de impacto, siendo la diferencia mayor con respecto a los demás percutores, a medida que se aumenta la energía de impacto. Es el percutor PL6 de 20mm de diámetro el que obtiene el mayor desplazamiento.

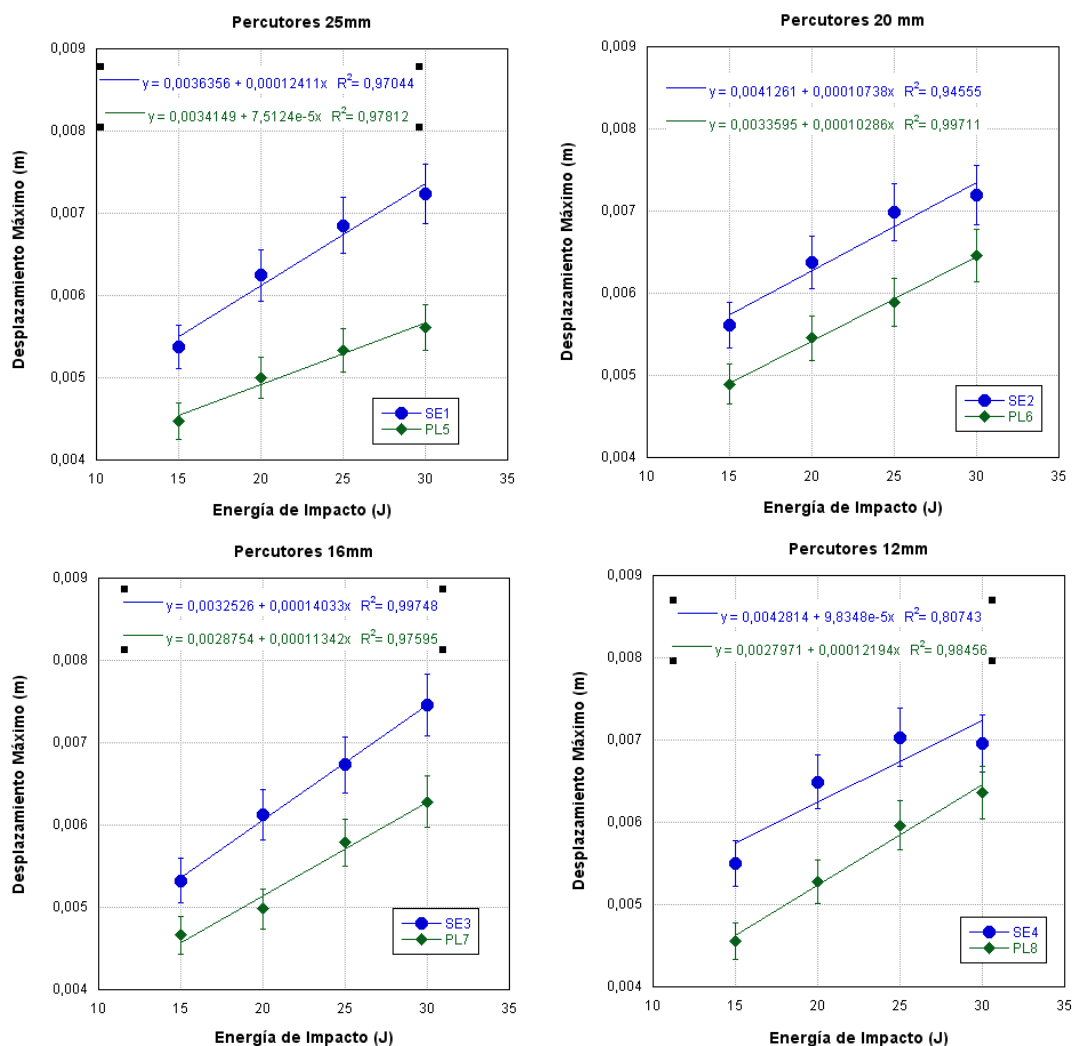


Figura 54. Comparación del desplazamiento máximo vs. la energía de impacto de percutores con el mismo diámetro.

Comparando los percutores con distintas geometrías pero el mismo tamaño del diámetro, se puede ver claramente que el desplazamiento máximo que se alcanza en las probetas con los percutores semiesféricos, es mucho mayor que el alcanzado con los percutores planos, para las mismas energías de impacto aplicadas y para percutores con el mismo diámetro.

4.2.3 Gráficas fuerza-desplazamiento

Varias investigaciones (Kwon y Sankar et al.1993; Wardle y Lagace et al.1998; Sjöblom, Hartness y Cordell et al.1988; Lagace, Willianson, Tsang, Wolf y Thomas et al.1993), utilizaron las gráficas de fuerza-desplazamiento para comparar las respuestas estructurales de los ensayos de impacto. Encontraron que las curvas de fuerza-desplazamiento contienen oscilaciones, que corresponden a caídas de carga debido a fallos en los laminados.

Para la toma de datos, se debe tener en cuenta que haya tiempo suficiente para que las fuerzas aplicadas por el percutor vuelvan a ser cero y acabe el ensayo, quedando cerrada la curva, es decir, que cesen las interacciones entre el percutor y la probeta.

A continuación, se muestra como ejemplo las gráficas de la fuerza de contacto frente a los desplazamientos, de uno de los percutores semiesféricos utilizados con cada una de las energías de impacto utilizadas.

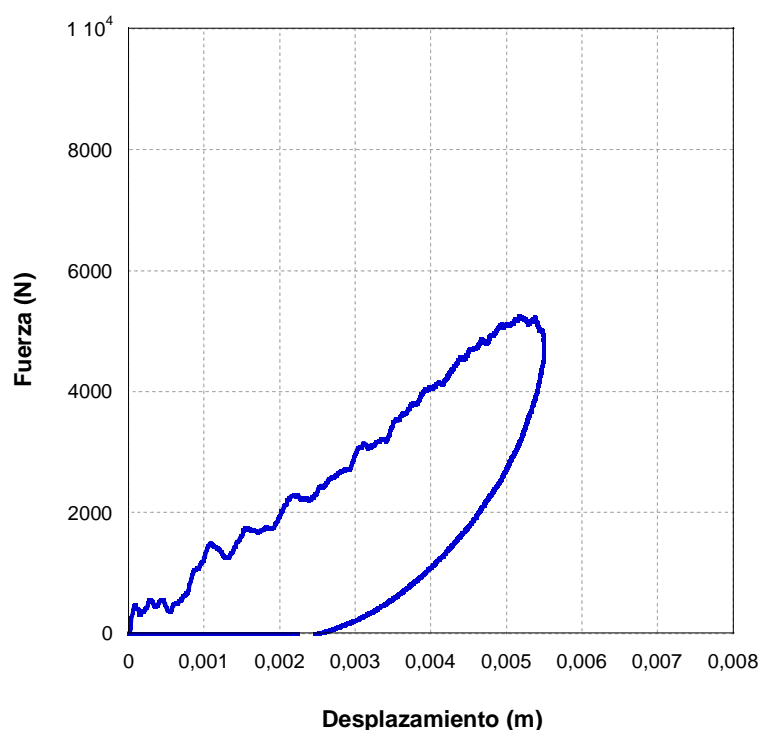


Figura 55. Comparación de los registros experimentales de fuerza-desplazamiento utilizando el percutor semiesférico $\varnothing=12,72\text{mm}$, para un nivel de energía de 15J

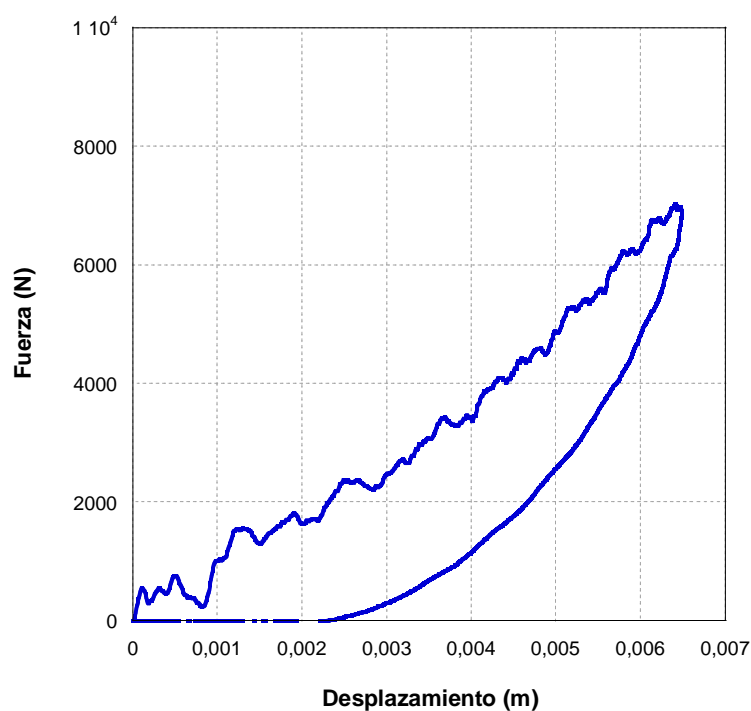


Figura 56. Comparación de los registros experimentales de fuerza-desplazamiento utilizando el percutor semiesférico $\varnothing=12,72\text{mm}$, para un nivel de energía de 20J

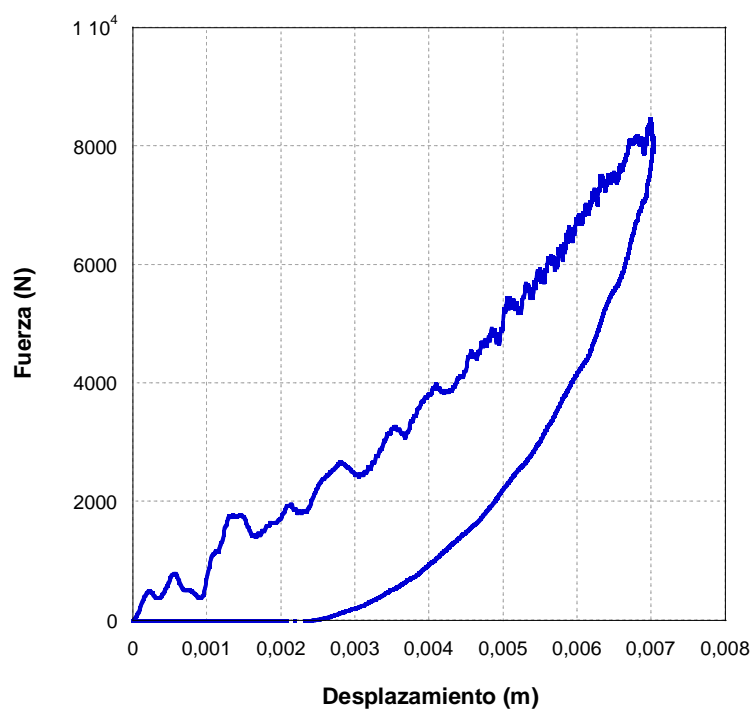


Figura 57. Comparación de los registros experimentales de fuerza-desplazamiento utilizando el percutor semiesférico $\varnothing=12,72\text{mm}$, para un nivel de energía de 25J

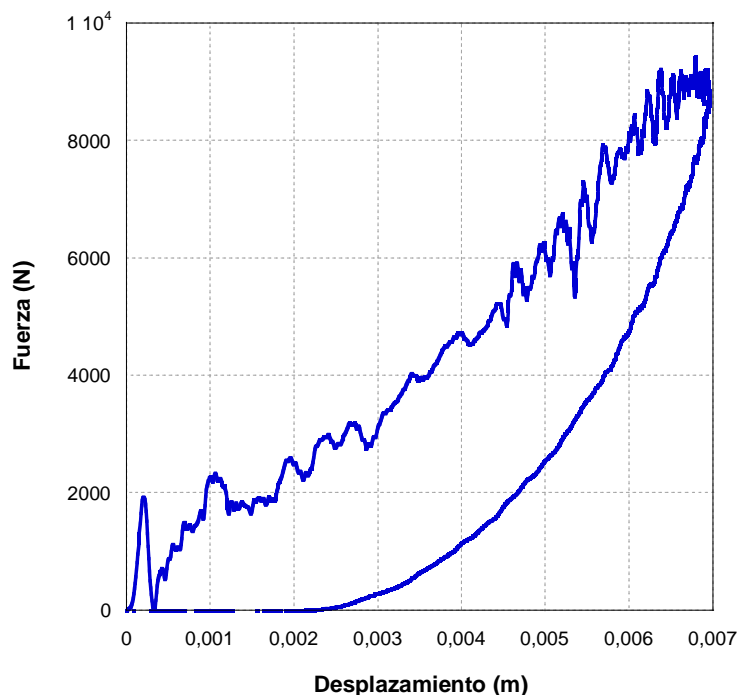


Figura 58. Comparación de los registros experimentales de fuerza-desplazamiento utilizando el percutor semiesférico $\varnothing=12,72\text{mm}$, para un nivel de energía de 30J

Estas gráficas que muestran la fuerza de contacto frente a los desplazamientos, son curvas que sirven para obtener el valor de la energía absorbida por la probeta durante el ensayo. La cantidad de energía absorbida en el impacto del percutor mediante la torre de caída, se obtiene al calcular el área bajo la curva de estas gráficas.

En todas las curvas de fuerza-desplazamiento obtenidas, hay histéresis en las fases de carga y descarga de la curva ya que son diferentes, por lo que todas las probetas han absorbido energía durante el impacto. Se observa que a medida que aumenta la energía de impacto aplicada, aumenta el área que abarca la curva debajo de la misma. Esto significa que la cantidad de energía absorbida por la probeta durante el impacto aumenta al aumentar la energía de impacto.

Como se ha dicho, la aparición de oscilaciones en las curvas fuerza-desplazamiento corresponden a caídas de carga debido a daños en los laminados, que en todos los casos ya aparecen con la menor energía de impacto utilizada, 15J.

Según Sutherland y Soares (2005), el inicio del daño en las fibras se indica mediante una respuesta irregular en la curva de la fuerza-desplazamiento. Según esto, para el caso del

percutor semiesférico SE4, utilizado como ejemplo, se produce rotura de fibras para las energías de impacto de 25 y 30J.

Además, en las gráficas se puede observar la misma tendencia de comportamiento en todas las curvas, y es que a medida que aumenta la energía de impacto aplicada, y por tanto, aumentan los daños, las curvas crecen hacia arriba. Esta tendencia, concuerda con los estudios realizados por Sutherland y Soares (2005), que según ellos, es debido a que los efectos del daño en la matriz llegan a ser importantes antes de que el daño en las fibras se vuelva significativo.

4.2.4 Energía

A partir de la integración numérica de la curva fuerza-desplazamiento, se puede calcular la curva energía durante los ensayos realizados. A continuación, se representan las curvas de la energía para cada tipo de percutor, en cada una de las energías de impacto ensayadas.

Percutores semiesféricos

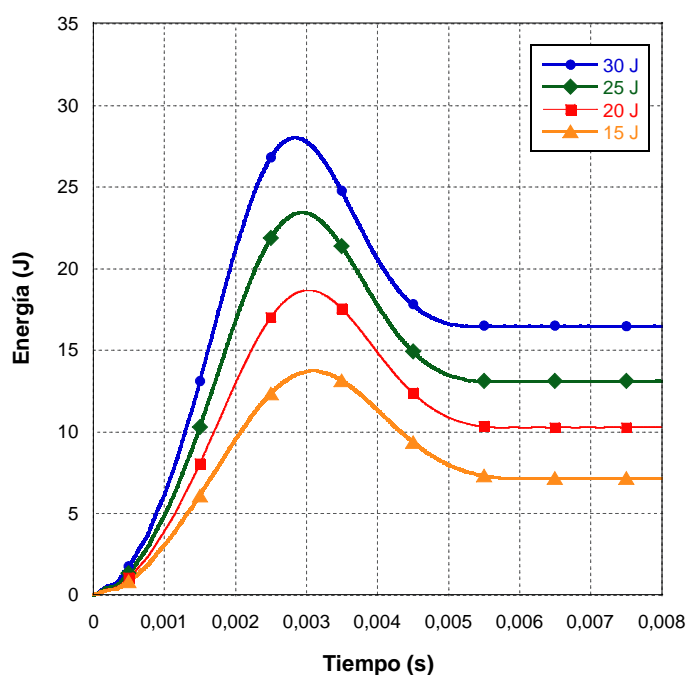


Figura 59. Representación de la energía vs. tiempo, utilizando el percutor semiesférico SE1 $\varnothing=25,40\text{mm}$, para cada nivel de energía

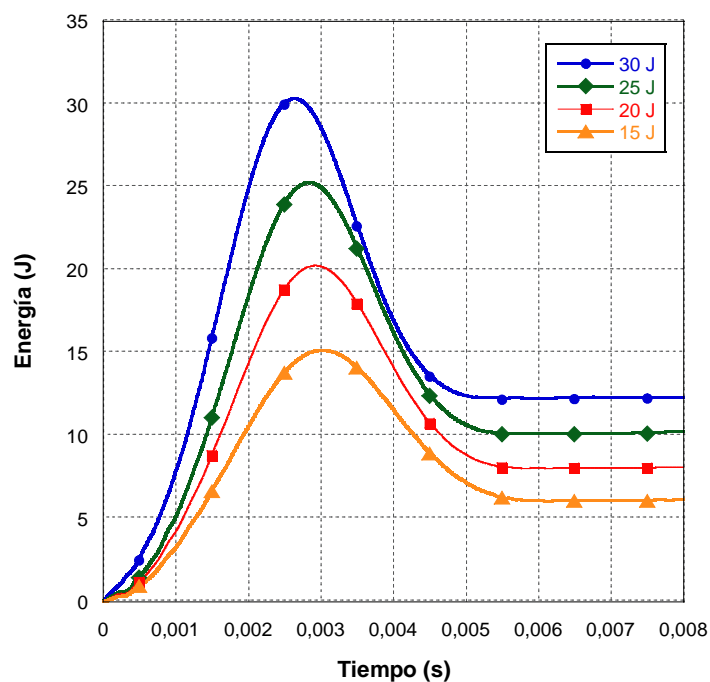


Figura 60. Representación de la energía vs. tiempo, utilizando el percutor semiesférico SE2 $\varnothing=20,40\text{mm}$, para cada nivel de energía

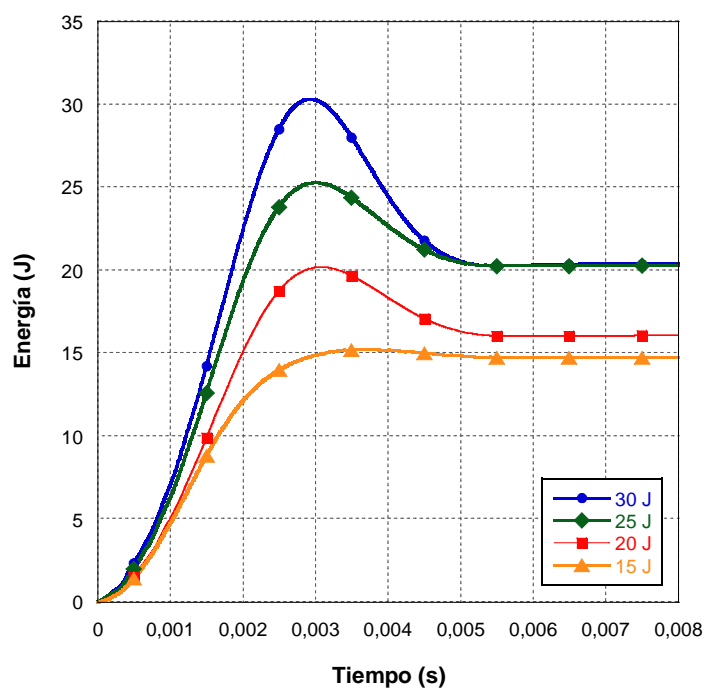


Figura 61. Representación de la energía vs. tiempo, utilizando el percutor semiesférico SE3 $\varnothing=16\text{mm}$, para cada nivel de energía

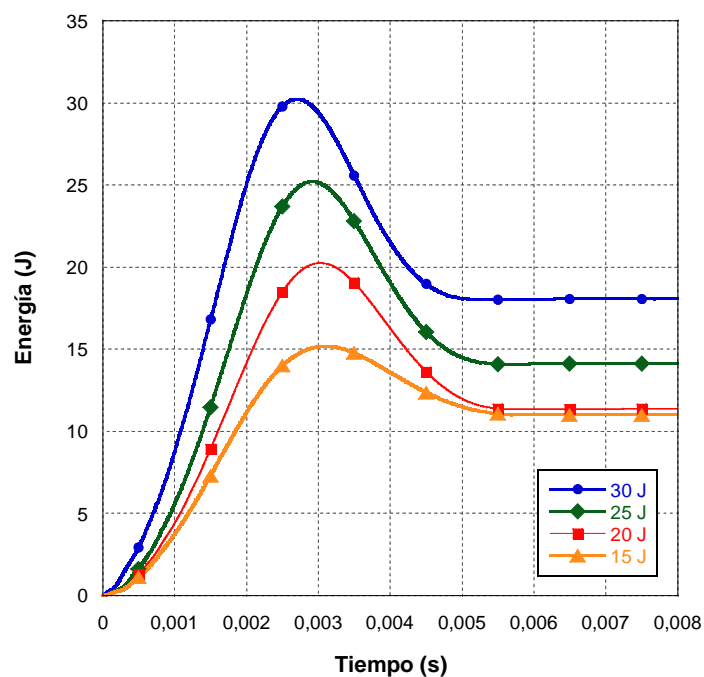


Figura 62. Representación de la energía vs. tiempo, utilizando el percutor semiesférico SE4 $\phi=12,72\text{mm}$, para cada nivel de energía

Percutores planos

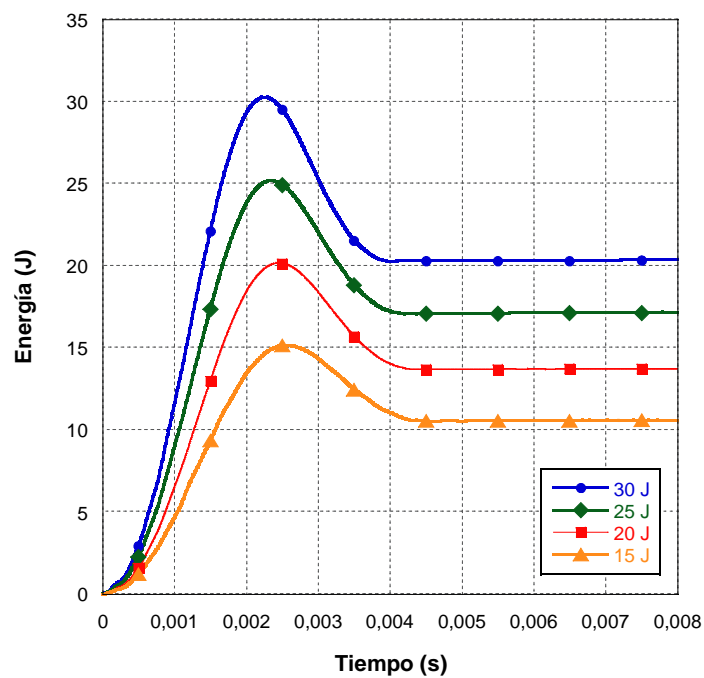


Figura 63. Representación de la energía vs. tiempo, utilizando el percutor plano PL5 $\phi=25,52\text{mm}$, para cada nivel de energía

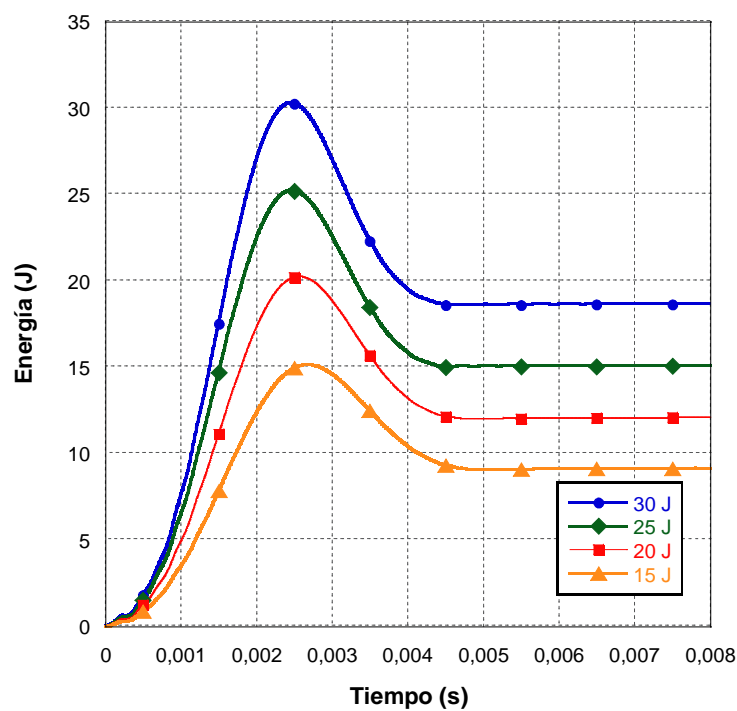


Figura 64. Representación de la energía vs. tiempo, utilizando el percutor plano PL6 $\varnothing=20\text{mm}$, para cada nivel de energía

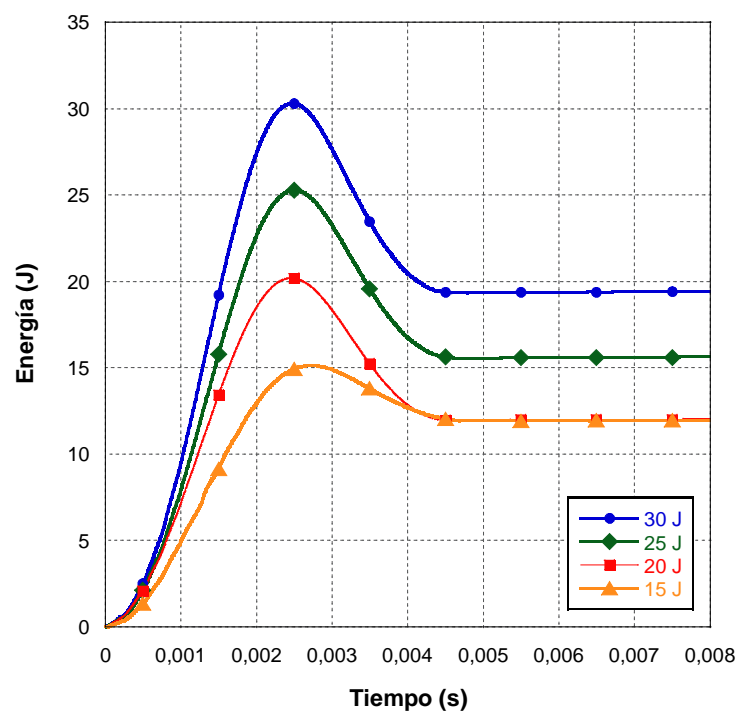


Figura 65. Representación de la energía vs. tiempo, utilizando el percutor plano PL7 $\varnothing=16,13\text{mm}$, para cada nivel de energía

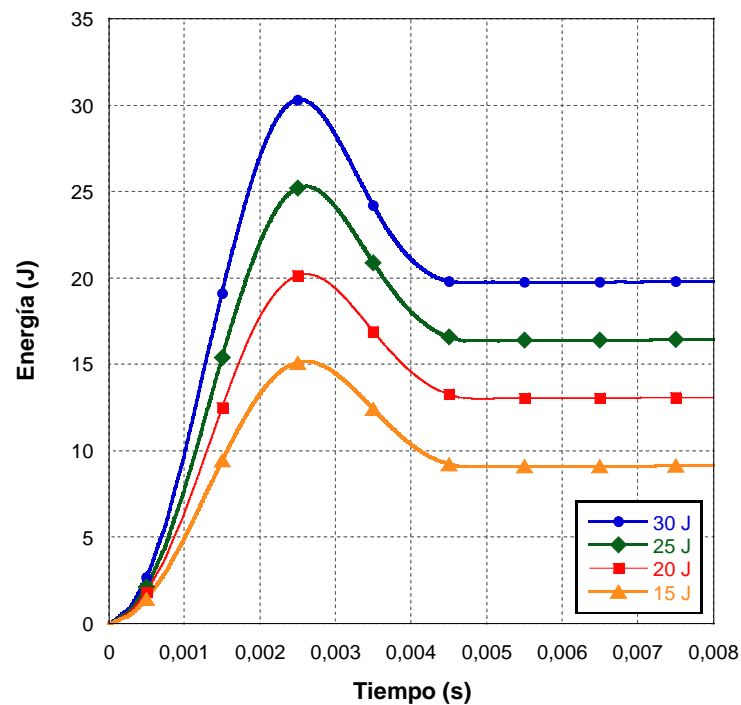


Figura 66. Representación de la energía vs. tiempo, utilizando el percutor plano PL8 $\varnothing=12,73\text{mm}$, para cada nivel de energía

En estas gráficas se puede observar cómo la energía se incrementa hasta alcanzar un valor máximo, que se corresponde con el de la energía de impacto, y a partir de este valor la energía va a comenzar a disminuir, hasta estabilizarse en un valor que va a corresponder al valor de la energía absorbida por la probeta, debido a los procesos de daño que han tenido lugar durante el impacto.

En el caso de los percutores planos, las gráficas que se obtienen de la energía son prácticamente iguales para todos los niveles de energía de impacto. Mientras que se observa una mayor variabilidad en el caso de los percutores semiesféricos, siendo ésta mayor a medida que aumenta la energía de impacto utilizada.

4.3 RESULTADOS CUANTITATIVOS

Una vez que a través de los registros de la fuerza que se obtuvieron durante los ensayos, y con las integraciones sucesivas realizadas mediante el programa KaleidaGraph, se han procesado todos los ensayos realizados calculando los valores más importantes como la fuerza máxima alcanzada, el desplazamiento máximo de la probeta y la energía. A continuación, se va a proceder a calcular la energía absorbida por las probetas ensayadas y el porcentaje de área dañada en las mismas, en función de la energía de impacto utilizada.

4.3.1 Energía absorbida

A continuación, se van a mostrar las gráficas de la energía absorbida por las probetas versus la energía de impacto utilizada en los diferentes ensayos en la torre de caída, diferenciando entre los casos de percutores semiesféricos y planos.

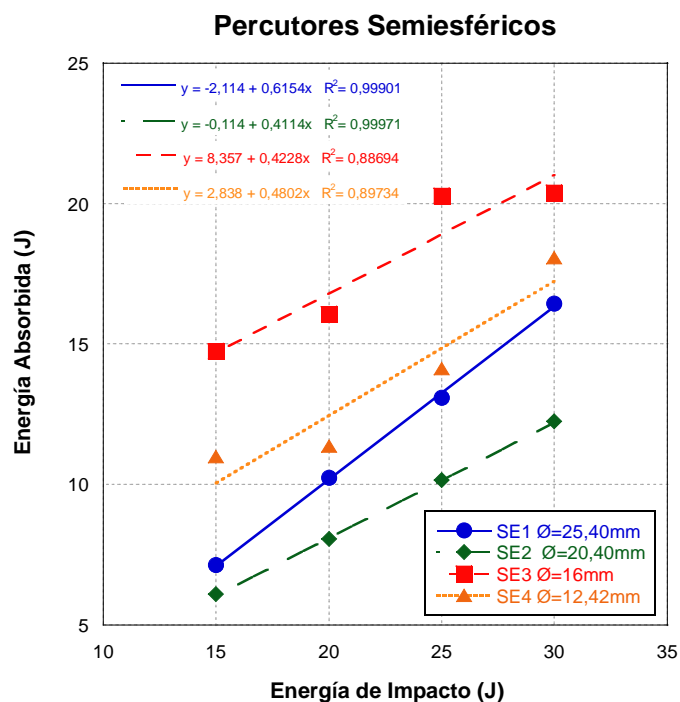


Figura 67. Representación de la energía absorbida vs. la energía de impacto, en ensayos en la torre de caída utilizando percutores semiesféricos

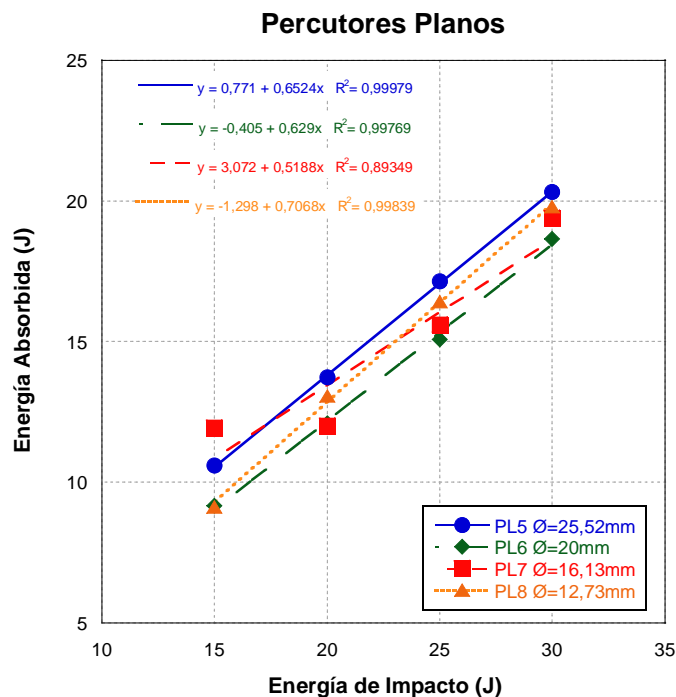


Figura 68. Representación de la energía absorbida vs. la energía de impacto, en ensayos en la torre de caída utilizando percutores planos

Las gráficas 67 y 68, muestran la relación lineal de la energía absorbida por la probeta en función de la energía de impacto, para el caso de los percutores semiesféricos y planos. Como se puede observar, tanto los percutores semiesféricos como los planos, muestran una relación lineal entre las variables con un coeficiente de regresión mayor de 0,88, por lo que todos los modelos obtenidos se consideran aceptables para hacer predicciones. Todas las correlaciones son directas, debido a lo cual, la energía absorbida aumenta al aumentar la energía de impacto.

En ambas gráficas se puede observar, que para todo el rango de energías estudiado, de 15J a 30J, en todos los casos se produce absorción de energía, es decir, se han producido daños en las probetas.

Además, se puede observar que si variamos el diámetro de los percutores utilizados, existen mayores diferencias en las medidas obtenidas de la energía absorbida por las probetas al variar el diámetro de los percutores semiesféricos que si se varía el diámetro de los percutores planos, un 58% con una energía de impacto de 15J y un 40% con una energía de 30J.

Mientras que en los percutores estas diferencias se reducen a un 23% con una energía de impacto de 15J y solo un 8% con una energía de 30J.

En general, al disminuir el diámetro de los percutores semiesféricos se observa un aumento de la energía absorbida por la probeta, excepto para el percutor SE2 de 20mm de diámetro. Para el caso de los percutores planos, el percutor de mayor diámetro es con el que se absorbe mayor energía.

A continuación, se muestran las gráficas que comparan la energía absorbida por las probetas al ser impactadas por percutores con distinta geometría del cabezal pero con el mismo diámetro.

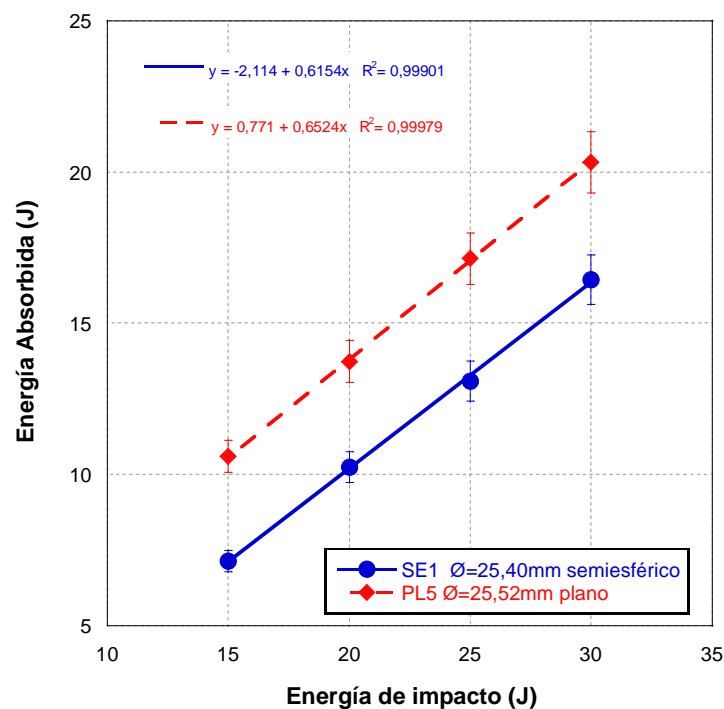


Figura 69. Representación de la energía absorbida vs. la energía de impacto, en ensayos en la torre de caída utilizando los percutores semiesférico SE1 y plano PL5 de 25mm de diámetro

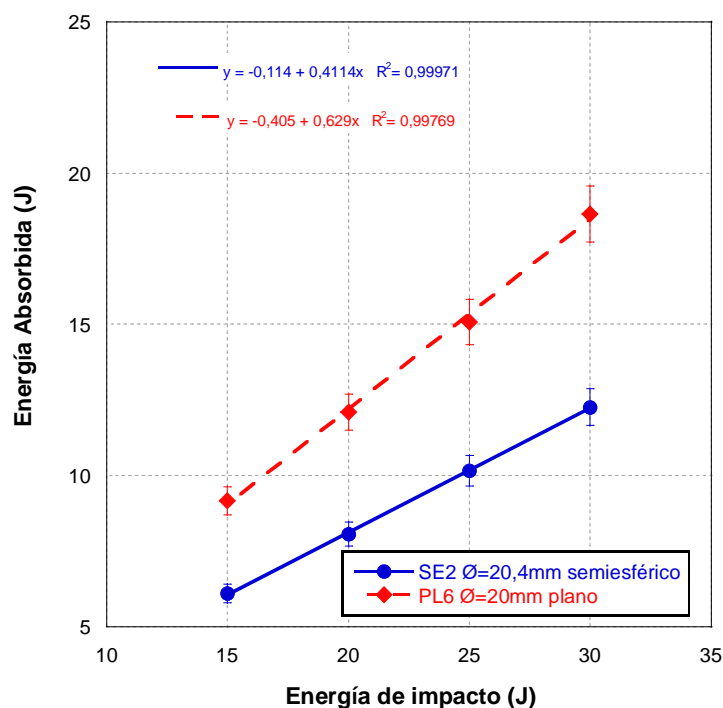


Figura 70. Representación de la energía absorbida vs. la energía de impacto, en ensayos en la torre de caída utilizando los percutores semiesférico SE2 y plano PL6 de 20mm de diámetro

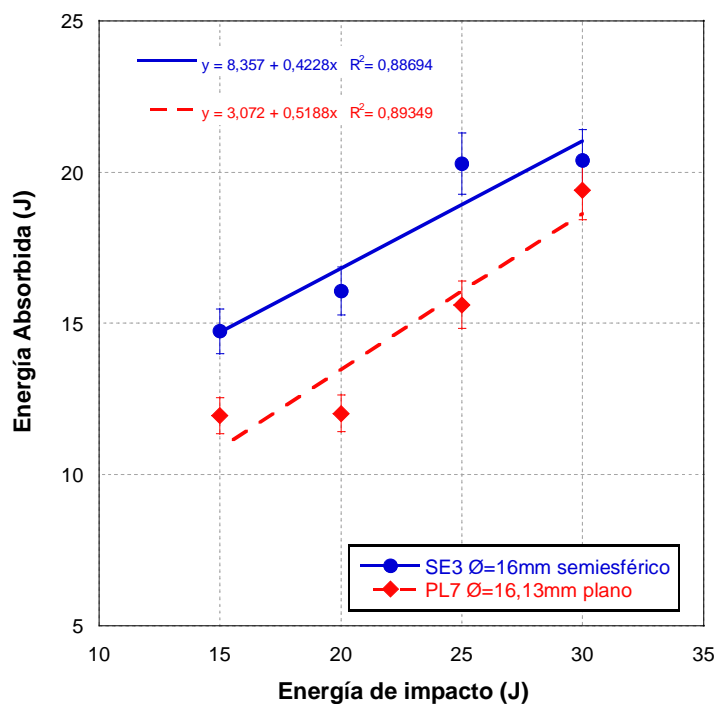


Figura 71. Representación de la energía absorbida vs. la energía de impacto, en ensayos en la torre de caída utilizando los percutores semiesférico SE3 y plano PL7 de 16mm de diámetro

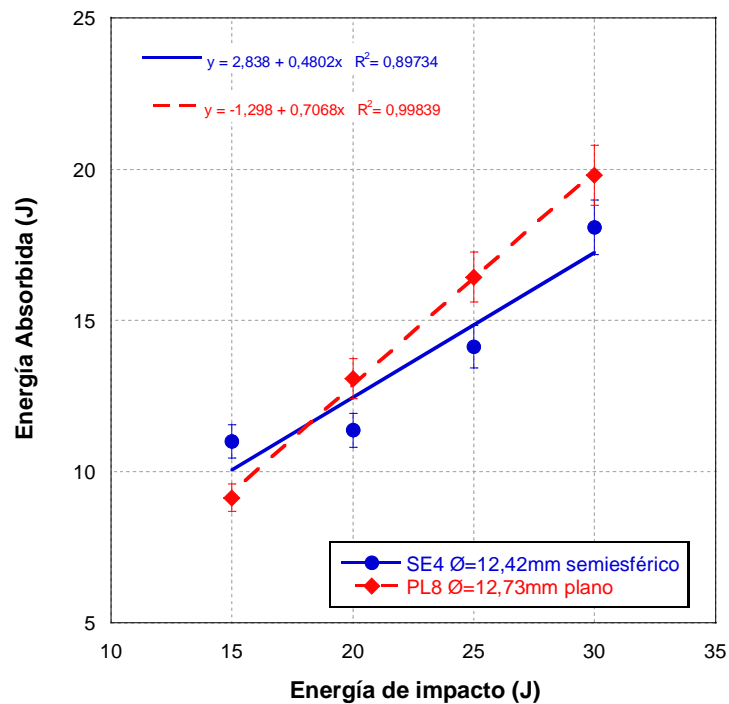


Figura 72. Representación de la energía absorbida vs. la energía de impacto, en ensayos en la torre de caída utilizando los percutores semiesférico SE4 y plano PL8 de 12,5mm de diámetro

En las gráficas 69 y 70, se comparan los valores de energía absorbida cuando se utilizan los percutores de mayor diámetro 25 y 20mm, en ambos casos la energía absorbida por la probeta es mucho mayor cuando se realiza el ensayo con un percutor plano.

En el caso de la gráfica 71, que compara los valores de la energía absorbida de los percutores de 16mm de diámetro, la energía absorbida es mayor cuando utilizamos el percutor semiesférico. Aunque la diferencia disminuye a medida que aumenta la energía de impacto aplicada, siendo la energía absorbida en ambos casos prácticamente la misma, para una energía de impacto de 30J.

En la gráfica 72, que compara los valores de la energía absorbida de los percutores de menor diámetro 12mm, vemos que existe muy poca diferencia de la energía que es absorbida por las placas en ambos casos, siendo prácticamente la misma.

En general, se puede decir que siempre que cumple la misma tendencia para todos los percutores utilizados, al aumentar la energía de impacto aumenta la energía absorbida por las probetas y que al comparar percutores con diferente tipo de cabezal y el mismo diámetro, las diferencias de las energías absorbidas medidas en las probetas disminuyen cuando disminuye el diámetro de los percutores utilizados.

4.3.2 Porcentaje de área dañada

Los datos cuantitativos sobre el porcentaje de área dañada efectuado en las probetas durante los diferentes ensayos, se han obtenido a través del programa de tratamiento de imágenes, Imagen-J. A partir de fotografías digitales realizadas a las probetas impactadas se han calculado dichas áreas, cuyos datos se representan en las gráficas 73 y 74.

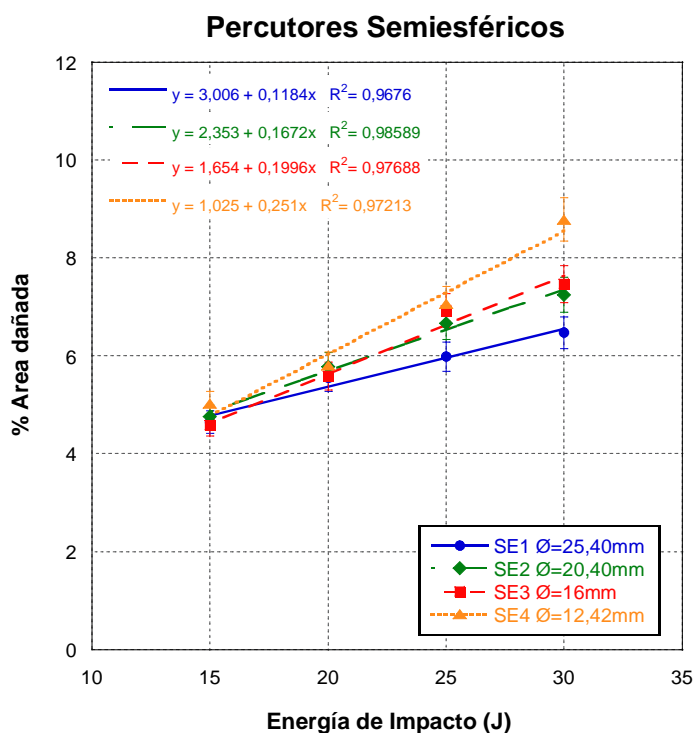


Figura 73. Representación del % área dañada vs. la energía de impacto, en ensayos en la torre de caída utilizando los percutores semiesféricos

En todos los casos existe una relación lineal con un coeficiente de regresión mayor de 0,97, por lo que sus comportamientos se ajustan bien a las rectas obtenidas. Todos los percutores semiesféricos han generado daños visibles en las placas ensayadas, en todos los niveles de energía de impacto. Además, se puede distinguir una misma tendencia para todos los percutores, que el porcentaje de área dañada aumenta al aumentar la energía de impacto aplicada.

Con el menor nivel de energía de impacto ensayado, 15J, el porcentaje de área dañada es prácticamente el mismo con una variación de un 9% para todos los percutores semiesféricos utilizados, pero a medida que se aumenta la energía de impacto, estas diferencias también van a aumentar, obteniendo la mayor diferencia, un 26%, con la energía de impacto de 30J.

El percutor semiesférico de mayor tamaño SE1, es con el que se obtienen los menores porcentajes de área dañada en las placas. El porcentaje de área dañada debido a los percutores SE2 y SE3, es prácticamente el mismo para todas las energías de impacto ensayadas. Y es el percutor de menor diámetro, SE4, con el que se obtiene los mayores porcentajes de área dañada en las placas.

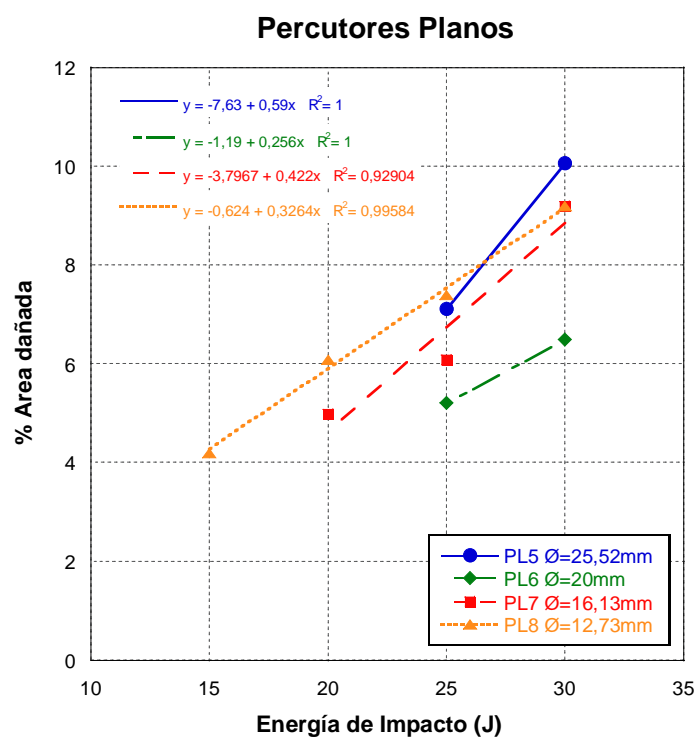


Figura 74. Representación del % área dañada vs. la energía de impacto, en ensayos en la torre de caída utilizando los percutores planos

Como se puede ver en la gráfica 74, en todos los casos existe una relación lineal con un coeficiente de regresión mayor de 0,92, por lo que se consideran buenos ajustes. El único percutor que produce un daño visible en las placas con todas las energías de impacto ensayadas, es el PL8, el percutor plano con el diámetro más pequeño. Los percutores planos de mayor diámetro, PL5 y PL6, no producen un daño visible en las placas hasta utilizar una energía de impacto de 25J. Y en el caso del percutor PL7, aparecen daños visibles a partir de una energía de impacto de 20J. El percutor de menor diámetro, PL8, genera los mayores porcentajes de área dañada en las placas para los menores valores de la energía de impacto, mientras que para una energía de impacto de 30J, es el percutor de mayor diámetro, PL5, el que genera más área dañada.

A continuación, se van a representar las graficas que comparan el porcentaje de área dañada en función de la energía de impacto, de percutores con distinto cabezal, semiesféricos y planos, pero que tienen el mismo diámetro.

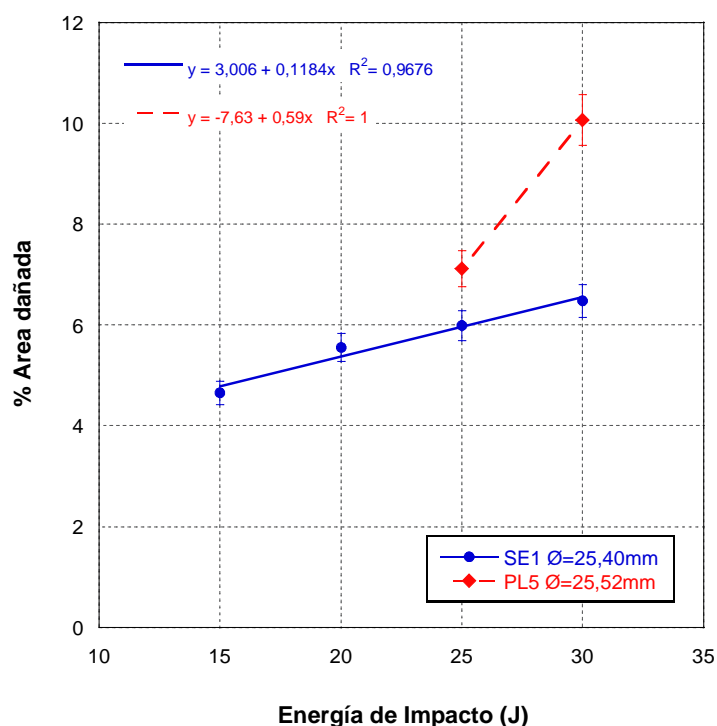


Figura 75. Representación del % área dañada vs. la energía de impacto, en ensayos en la torre de caída utilizando el percutor semiesférico SE1 y plano PL5 de diámetro 25,5mm

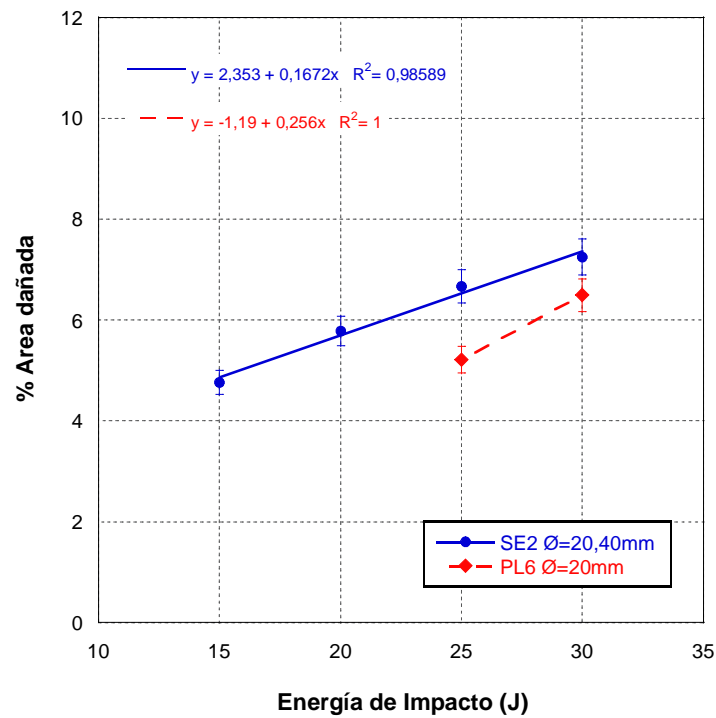


Figura 76. Representación del % área dañada vs. la energía de impacto, en ensayos en la torre de caída utilizando el percutor semiesférico SE2 y plano PL6 de diámetro 20mm

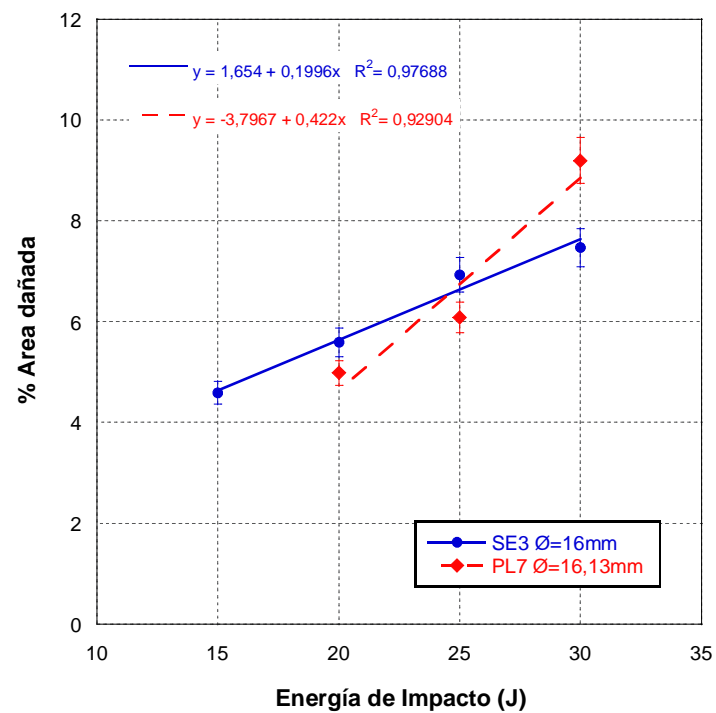


Figura 77. Representación del % área dañada vs. la energía de impacto, en ensayos en la torre de caída utilizando el percutor semiesférico SE3 y plano PL7 de diámetro 17mm

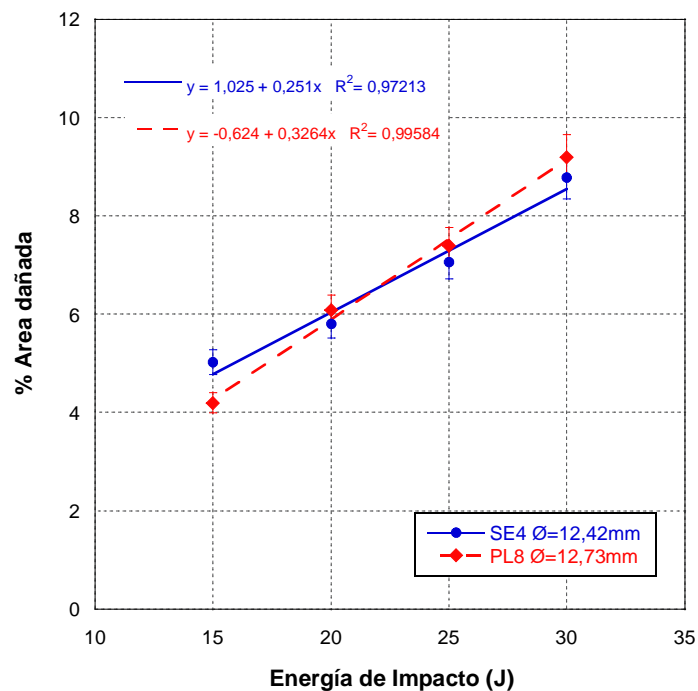


Figura 78. Representación del % área dañada vs. la energía de impacto, en ensayos en la torre de caída utilizando el percutor semiesférico SE4 y plano PL8 de diámetro 12,5mm

Según se puede observar en las gráficas, únicamente cuando se utilizan percutores con cabezal semiesférico para realizar los ensayos, aparecen daños que se pueden observar visualmente en las probetas en todos los niveles de energías de impacto ensayados. En el caso de los percutores planos, solo ocurre esto con el percutor de menor diámetro PL8.

Comparando las gráficas 73 y 74, se puede observar que existen mayores diferencias en los valores obtenidos del porcentaje de área dañada en las placas, si se varía el diámetro de los percutores planos que si varía el diámetro de los percutores semiesféricos.

Al comparar diferentes percutores con el mismo diámetro, se puede ver claramente que para las menores energías de impacto utilizadas, el porcentaje de área dañada obtenido por los percutores semiesféricos es mayor en todos los casos. Pero esta diferencia es menor, a medida que disminuye el diámetro de los percutores. Para el caso de la mayor energía de impacto, 30J, son los percutores planos los que obtienen un mayor porcentaje de área dañada, excepto para el percutor PL6, de 20mm de diámetro. En la gráfica 78 que compara los percutores de menor diámetro, PL8 y SE4, se obtienen unos valores de porcentaje de área dañada prácticamente iguales, en todos los niveles de energía de impacto.

4.4 RESULTADOS CUALITATIVOS

En este apartado, se va a evaluar la progresión de la evolución del daño, generado en las placas de material compuesto impactadas mediante ensayos realizados en una torre de caída. A continuación, se muestran dos tablas, 10 Y 11, con algunos ejemplos de imágenes digitales obtenidas de las placas impactadas. Se clasifican en función de cada tipo de percutor utilizado y para cada una de las energías de impacto ensayadas.





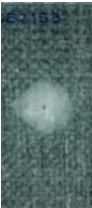











PERCUTOR SEMIESFÉRICO	ENERGÍA DE IMPACTO			
	15 J	20 J	25 J	30 J
SE1 $\varnothing = 25,40\text{mm}$ Masa= 122gr				
SE2 $\varnothing = 20,4 \text{ mm}$ Masa= 3788gr				
SE3 $\varnothing = 16 \text{ mm}$ Masa= 3947gr				
SE4 $\varnothing = 12,42 \text{ mm}$ Masa= 3766gr				

Tabla 10. Observación visual del daño en material compuesto ensayado con percutores semiesféricos en la torre de caída














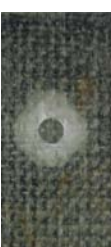
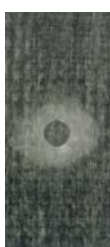

PERCUTOR PLANO	ENERGÍA DE IMPACTO			
	15 J	20 J	25 J	30 J
PL5 $\varnothing = 25,52\text{mm}$ Masa= 4052gr				
PL6 $\varnothing = 20\text{mm}$ Masa= 3989gr				
PL7 $\varnothing = 16,13\text{mm}$ Masa= 3954gr				
PL8 $\varnothing = 12,73\text{mm}$ Masa= 3934gr				

Tabla 11. Observación visual del daño en el material compuesto ensayado con percutores planos en la torre de caída

En estas imágenes se pueden observar las distintas formas del área dañada, gracias a que el material utilizado, laminado de tejido equilibrado de fibra de vidrio E en matriz poliéster, es un material traslúcido.

Las placas de material compuesto de matriz polimérica sometidas a cargas de impacto, cómo ya se explicó, pueden absorber la energía de impacto mediante varios mecanismos de fallo, entre los que podemos distinguir los siguientes: deformación y micro-rotura de la matriz, rotura de la matriz, delaminación, despegue y roturas de fibras. El daño se iniciaría mediante la rotura de la matriz y delaminación, pudiendo producirse despegues de fibras, y siendo la rotura de fibra el último modo de fallo.

Cómo consecuencia, es posible caracterizar una progresión común de los fallos producidos por los diferentes percutores utilizados, a medida que la energía incidente de impacto se incrementa. Se van a diferenciar tres etapas:

- 1) **Rotura de la matriz:** Este tipo de fallo se produce con las más bajas energías de impacto, sin embargo los daños no pueden ser observados visualmente. En este daño se van a incluir deformación y micro-rotura de la matriz y la rotura de la matriz.
- 2) **Delaminación:** Se producen delaminaciones centrales y circulares, para pequeños valores de energía de impacto, las cuáles aumentan a medida que aumenta la energía de impacto aplicada. Van acompañadas por pequeñas deformaciones y despegamientos de las fibras de las capas superiores, una penetración permanente bajo el percutor debido al contacto que se produce entre el percutor y la placa ensayada durante el impacto, y rotura de la matriz en la cara posterior al impacto. Las delaminaciones son visibles, ya que cuando se producen en las probetas, aparecen cómo zonas blancas y brillantes alrededor del punto de impacto.
- 3) **Roturas de fibra:** Es el último tipo de daño que aparece en las probetas impactadas. Los fallos en las fibras, agrietamiento o partición, principalmente se encontraron en el centro de la cara trasera de la probeta, en la que también aparece una mayor degradación de la matriz.

Percutores semiesféricos

La tabla 10 muestra la progresión del daño en las placas impactadas debido a los percutores semiesféricos. Como podemos ver, las probetas exhiben daño visible en todos los niveles de energías ensayados, aún cuando han sido sometidas a impactos a un nivel muy bajo de energía, 15J.

El daño de la cara impactada es muy parecido para todas las muestras: una pequeña penetración permanente bajo el percutor, en el punto de impacto y a continuación, se extienden los daños. En este caso, el área de impacto se trata de un área muy reducida. La rotura de las fibras se produce para las energías de impacto más altas, 25 y 30J, y siempre se producen en la parte posterior.

Con todos los percutores semiesféricos, en general, se observa que para las más bajas energías de impacto, 15 y 20J, la forma del área dañada en los diferentes ensayos, se aproxima a una circunferencia. A medida que aumenta la energía de impacto, las delaminaciones comienzan a crecer principalmente en las direcciones de la trama y la urdimbre, presentando en la mayoría de los casos una forma más irregular, en forma de rombo.

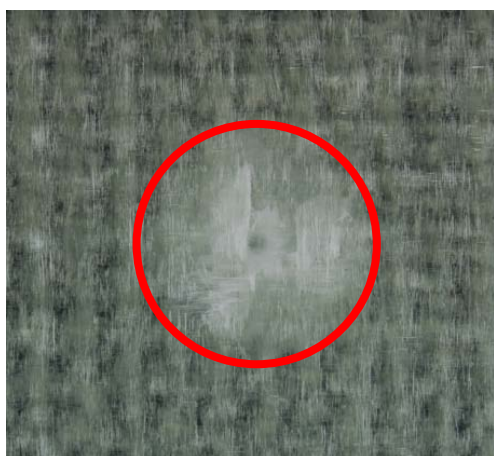


Figura 79. Representación del daño con percutores semiesféricos.

Percutores planos

Observando las imágenes de la tabla 11, no se detectan daños visualmente, al utilizar energías de impacto de 15 y 20J, para los percutores planos de mayor diámetro PL5 y PL6. El percutor plano con el de menor diámetro, PL8, es el único que genera daños en todos los niveles de energía. Las curvas de fuerza-desplazamiento que se calcularon anteriormente, reflejaban que en todos los ensayos las placas absorbieron energía, por lo que los daños que se han producido en este caso, se tratarían de roturas en la matriz que no son detectadas visualmente.

Para el caso de los percutores planos, la zona de impacto de la cara superior de la probeta, se corresponde con el tamaño del percutor utilizado. En este caso, a diferencia de lo que ocurre con los percutores semiesféricos, en esta zona no se producen daños visibles en el material debajo del percutor, por lo que, si se inducen daños en esta zona se corresponderían a roturas de la matriz y aplastamiento de las capas superiores, que son daños no visibles. El daño visible se extiende alrededor de la zona de impacto.

La región que rodea el perímetro impactado por el percutor plano, presenta un color blanco más intenso y brillante, que el resto que se extiende hacia la periferia exterior. Esta zona presenta una mayor intensidad de daño, en el que las delaminaciones son más severas y además, se produjo despegue de algunas de las fibras situadas alrededor del perímetro de impacto. En general, se observa que la forma del área dañada en los diferentes ensayos, se puede aproximar a una circunferencia, cuándo los daños comienzan a ser visibles. Pero a medida que los daños aumentan, se aproxima a una forma de elipse.

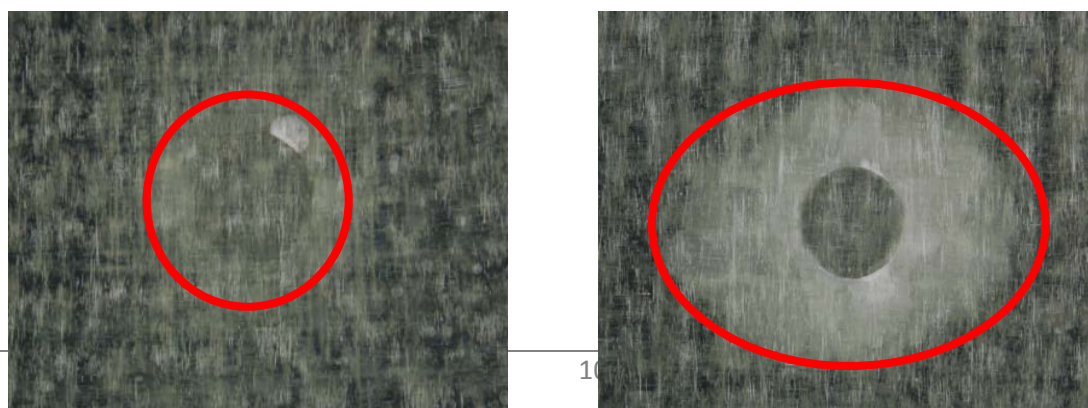


Figura 80. Representación del daño con percutores planos.

En este caso la forma del daño para las diferentes energías de impacto ensayadas, varía dependiendo del percutor que se haya utilizado, siendo mayor la extensión del daño al aumentar la energía incidente y disminuir el diámetro del percutor.

Las imágenes de las tablas 10 y 11, permiten confirmar la afirmación que se hizo en el análisis cuantitativo previo del porcentaje de área dañada, la cual indicaba que a medida que la energía de impacto aumenta, la extensión del daño también se incrementa. Por lo tanto, los resultados cualitativos obtenidos coinciden con los cuantitativos presentados previamente.

Capítulo 5.

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

5.1 CONCLUSIONES

En este proyecto se ha estudiado la influencia que tiene la geometría del percutor sobre el comportamiento frente a impactos de baja velocidad de un laminado de tejido equilibrado de fibra de vidrio E en matriz poliéster, en función de la energía de impacto utilizada.

Para ello, se han llevado a cabo ensayos de impactos de baja velocidad mediante una torre de caída, utilizando ocho tipos de percutores con diferentes formas, semiesféricos y planos, y diferentes tamaños, para un rango de energías de impacto de 15 a 30J. A continuación, se ha realizado el tratamiento de los datos obtenidos durante los ensayos, mediante el programa KaleidaGraph, una herramienta de análisis de datos y gráficas. Y finalmente, se ha efectuado la evaluación no destructiva de las placas impactadas, utilizando el programa de tratamiento de imágenes Image-J.

Las conclusiones principales de este proyecto se van a establecer, evaluando los resultados obtenidos en función del tamaño del percutor y de la geometría del mismo.

A. En función del tamaño del percutor:

- Percutores semiesféricos:
 - La fuerza máxima se alcanza con el percutor SE2 de 20mm de diámetro.
 - El desplazamiento máximo es independiente del tamaño del percutor.
 - La máxima energía absorbida se obtiene con el percutor de menor diámetro SE4.
 - El máximo porcentaje de área dañada se obtiene con el percutor de menor diámetro SE4, pero existe una menor intensidad de daño comparado con el daño producido con el resto de percutores semiesféricos.

- Percutores planos:
 - La fuerza máxima se alcanza con el percutor PL6 de 20mm de diámetro.
 - El desplazamiento máximo se alcanza con el percutor PL6 de 20mm de diámetro.
 - La máxima energía absorbida se obtiene con el percutor de mayor diámetro PL5.
 - El máximo porcentaje de área dañada se obtiene con el percutor de mayor diámetro PL5, pero existe una menor intensidad de daño, comparado con el daño producido con el resto de percutores planos.
- Con los resultados obtenidos se puede concluir que el material ensayado muestra un mejor comportamiento frente a impactos de baja velocidad con los percutores semiesféricos de menor diámetro y los percutores planos de mayor diámetro.

B. En función de la geometría del percutor:

- La fuerza máxima se ha obtenido con los percutores planos.
- El desplazamiento máximo que sufren las probetas, es mayor cuando se utilizan percutores semiesféricos para todo el rango de energías de impacto utilizado.
- Al evaluar la energía absorbida por las probetas en los ensayos, en función de la energía de impacto, observamos que la máxima energía absorbida se ha obtenido con los percutores planos al aumentar la energía de impacto. Con la menor energía de impacto utilizada, 15J, no hay diferencias en la cantidad de energía absorbida por los percutores planos y semiesféricos.
- Al analizar la evolución del daño en las probetas impactadas, se observó que los percutores semiesféricos generan un daño visible con todas las energías de impacto utilizadas. Mientras que los percutores planos, y a medida que aumenta su diámetro, se necesitan mayores energías para iniciar en la probeta un daño que sea visible.

- La evaluación del área dañada por impacto, demuestra que las máximas extensiones del daño se alcanzaron en las placas impactadas con los percutores planos pero la intensidad del daño obtenida es menor que con los percutores semiesféricos. Comparando las áreas dañadas para los diferentes percutores, se puede afirmar que la diferencia del porcentaje del área dañada disminuye a menores energías de impacto y al disminuir el diámetro de los percutores.
- La variación de la intensidad del daño producido en las probetas, cuando se utilizan percutores semiesféricos con distinto diámetro y la misma energía de impacto, es casi inapreciable visualmente. Mientras que en el caso de los percutores planos, se puede ver claramente, que el grado de la intensidad del daño varía con el tamaño del percutor, siendo mayor el daño a medida que disminuimos el diámetro del percutor. En las fotografías se pueden observar un aumento notable de todos los modos de fallo en el material impactado: rotura de matriz, delaminaciones, despegue y roturas de fibras.
- Los resultados obtenidos permiten afirmar, que el material ensayado muestra un mejor comportamiento frente a impactos de baja velocidad con los percutores planos, ya que presenta una mayor capacidad de absorción de energía y un menor grado de intensidad en el daño.
- Además, se puede concluir que a medida que el diámetro de los percutores disminuye, la respuesta del material va a ser prácticamente la misma, tanto con los percutores semiesféricos como con los percutores planos, es decir, la respuesta del material es independiente de la forma del percutor.

Podemos concluir que los ensayos experimentales realizados una torre de caída, han permitido determinar la influencia de la geometría de los percutores en la evolución del daño en laminados de tejido de fibra de vidrio E en matriz poliéster, frente a impactos de baja velocidad.

5.2 TRABAJOS FUTUROS

Cómo posibles trabajos futuros a este proyecto fin de carrera, se proponen los siguientes:

- Validación de los resultados obtenidos en la evaluación de los daños de las probetas ensayadas mediante inspección visual, por medio de otras técnicas de inspección no destructiva cómo la inspección por ultrasonidos, capaz de localizar discontinuidades tanto externas cómo internas. Considerando que en el caso de los percutores planos a bajas energías de impacto no se aprecian daños visibles.
- Extender el trabajo experimental desarrollado, ampliando el rango de energías de impacto utilizado hasta llegar a la perforación del material. Esto servirá para comprobar si los resultados obtenidos del comportamiento del material frente a percutores de distinta geometría se mantienen con energías de impacto superiores a 30J, examinando la progresión del daño y la absorción de energía del material.
- Ampliar el estudio realizado en este proyecto, mediante la realización de nuevos ensayos de impacto sobre diferentes tipos de materiales compuestos, y comprobar si la influencia de la geometría del percutor es independiente de la configuración del material utilizado.
- Evaluar la resistencia residual mediante ensayos de compresión después de impacto.

Capítulo 6.

BIBLIOGRAFÍA

- Abrate, S.**, "Impact on laminated composite materials", 44-155, (1991).
- Abrate, S.**, "Impact of composite structures", *Cambridge University Press, UK*, (1998).
- Abrate S.**, "Impact on laminated composites: recent advances", *Appl Mech Rev*, 47, 517-543, (1994).
- Baucom J.N., Zikry M.A.**, "Low velocity impact damage progression in woven E-glass composite systems", *Composites, part A: applied and manufacturing*, 36, 658-664, (2005).
- Cantwell W.J., Morton J.**, "Comparison of the low and high velocity impact response of CFPR", *Composite*, 20,6, (1989).
- Cantwell W.J., Morton J.**, "The impact resistance of composite materials", *Composites*, 22:347-62, (1991).
- Cartié D.D.R., Irving P.E.**, "Effect of resin and fibre properties on impact and compression after impact performance of CFRP", *Composites*, 33:483-93, (2002).
- Choi H.Y., Downs R.J., Chang F.K.**, "A new approach toward understanding damage mechanisms and mechanisms of laminated composites due to low-velocity impact", *Part 1-Experiments. J. Compos. Mater.*, 25, 992-1011, (1991).
- Corum J.M., Battiste R.L., Ruggles-Wrenn M.B.**, "Low energy impact effects on candidate automotive structural composites", *Composites science and technology*, 63, 755-769, (2003).
- Finn S.R., He Y.F., Springer G.S.**, "Delaminations in composite plates under transverse impact loads", *Compos. Struct.*, 23, 191-204, (1993).
- Graves LJ.**, "Failure mechanisms in GFRP armour", *Unpublished UK DRA. Report*, (1992).
- Henkhaus, Ramirez**, "Overview or research on composite material impact behaviour", *16th engineering mechanics conference*, (2003).
- Hirai Y., Hamada H., Kim J.K.**, "Impact response of woven glass-fabric composites. Effect of fibre surface treatment", *Composites Science and Technology*, 58(1): 91-105, (1998).
- Hosseinzadeh R., Shokrieh M.M., Lessard L.**, "Damage behavior of fiber reinforced composite plates subjected to drop weight impacts", *Composites science and technology*, (2005).

Jih C.J., Sun C.T., “ Prediction of delamination in composite laminates subjected to low velocity impact”, *Journal of Composite Materials*, 27:684-701, (1993).

Joshi S.P., Sun C.T., “ Impact induced fracture in a laminated composite”, *Journal of Composite Materials*, 19:51-66, (1985).

Kaczmarek H., Maison S., “Comparative ultrasonic analysis od damage in CFRP under static indentation and low velocity impact”, *Composites science and technology*, 51, 11-26, (1994).

Kasano H., “Recent advances in high-velocity impact perforation of fiber composite laminates”, *JSME International journal*, 42,2,147-157, (1991).

Kwon YS., Sankar BV., “Indentation-flexure and low-velocity impact damage in graphite epoxi laminates”, *Journal of Composites Technology on Research*, 15(2):101-11, (1993).

Lee S.W.R., and Sun C.T., “ A quasic-static penetration model for composite laminates”, *J. Compos. Mater.*, 27(3), 251-271, (1993).

Lee SM., Zahuta P., “Instrumented impact and static indentation of composites”, *Journal of Composite Materials*, 25(2):204-22, (1991).

Mines RAW., Roach AM., Jones N., “High velocity perforation behaviour of polymer composite laminate”, *Int. J. Impact Eng.*, 22:561-88, (1999).

Miravete A., “Materiales compuestos Vol. I y II”, *Reproducciones, S. A.*, (2000).

Mouritz A.P., Gellert E., Burchill P., “Review of advanced composite structures for naval ships and submarines”, *Compos. Struct.*, 53:21-41, (2001).

Myers F.A., “Impact Behaviour of SMC Composites”, *37th Annual Conference. SPI, Washington D.C., January 11-15*, (1982).

Naik N.K., Sailendra Meduri, “Polymer matrix composites subjected to low velocity impact: effect of laminate configuration”, *Composites science and technology*, 61, 1429-1436, (2001).

Nunes L.M., Paciornik S., D'almeidad J.R.M., “Evaluation of the damage area of glass-fiber-reinforced epoxi-matrix composite materials submitted to ballistic impacts”, *Composites Science and Technology*, 64,945-954, (2004).

Reis L., Freitas M., "Damage grow analysis of low velocity impacted composite panels", *Composite Structures*, 38, 509-515, (1997).

Richardson MOW, Wisheart MJ., "Review of low-velocity impact properties of composite materials", *Compos Part A-Appl Sci Manuf*, 12, 23-31, (1996).

Rutherford KL., "Indentation and penetration resistance of composite materials to pointed projectiles", *Unpublished UK DRA. Report*, (1992).

Schoepper G.A., Abrate S., "Delamination threshold loads low velocity impact on composite laminates", *Composites part A: applied science and manufacturing*, 31, 903-915, (2000).

Scott I.G., Scala C.M., "A review of non-destructive testing of composite materials", *Butterworth & Co.* (1982).

Sierakowski R.L., Chaturvedi, "Effects of impactor size on impact damage-growth and residual properties in a SMC-R50 composite". *Journal of composite material*, Vol.19,(1985).

Sjöblom P.O., Hartness T.M., Cordell T.M., "On low-velocity impact testing of composite materials", *Journal of Composite Materials*, 22(1):30-52, (1988).

Sutherland L.S., Guedes Soares C., "Impact on low fibre volume, glass/polyester rectangular plates", *Composite structures*, 68, 13-22, (2005).

Wen H.M., "Predicting the penetration and perforation of FRP laminates struck normally by projectiles with different nose shapes", *Composite structures*, 49, 321-329, (2000).

Xiong Y., Poon C., Straznicky P.V., Vietinghoff K., "A prediction methods for compressive strength of impact damage composite laminates", *Composite Structures*, 30, 357-367, (1995).

Zhou G., Greaves LJ. "Damage resistance and tolerance of thick laminated woven roving GFRP plates subjected to low-velocity impact. Impact behaviour of fibre-reinforced composite materials and structures", *CRC. Press, Woodhead Pub*; 133-185, (2000).

Zhou G., Lloyd J.C., McGuirk J.J., "Experimental evaluation of geometric factors affecting damage mechanisms in carbon/epoxy plates", *Composites part A: applied science and manufacturing*, 32, 71-84, (2001).



Zhu G., Goldsmith W., Dharan C.K.H., “Penetration of laminated kevlar by projectiles”, *Int J Solids and Structures*, 29(4): 399-420, (1992).

Zukas J.A., Nicholas T., Swift H., Greszczuk L.B., Curran D.R., “Impact Dynamic”, *Krieger Publishing Company, Florida, USA*, (1992).